

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

УДК 004.42:621.382

На правах рукописи

ВОРОНКО
Тимофей Максимович

**МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАСЧЕТА
ЭЛЕМЕНТОВ ОХЛАЖДЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
ПРИБОРОВ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ В РАЗЛИЧНЫХ
МАКРОКЛИМАТИЧЕСКИХ РАЙОНАХ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание степени магистра

по специальности 1-39 80 03 Электронные системы и технологии
(профилизация «Компьютерные технологии проектирования
электронных систем»)

Минск 2024

Работа выполнена на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный руководитель: **ПИСКУН Геннадий Адамович**,
доцент кафедры проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», кандидат технических наук, доцент

Рецензент: **КИРИЧУК Андрей Викторович**,
Директор Представительства № 2 ЗАСО «Промтрансинвест» в г. Минске, магистр техники и технологии

Защита диссертации состоится «29» апреля 2024 г. года в 17²⁵ часов на заседании Государственной экзаменационной комиссии по защите магистерских диссертаций в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 413, тел. 293-20-80, E-mail: kafpiks@bsuir.by

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

ВВЕДЕНИЕ

В процессе эксплуатации радиоэлектронное средство (далее – РЭС) подвергается воздействиям различных дестабилизирующих факторов, а также температур различных источников, которыми являются не только окружающая среда, но и сама эксплуатируемая техника. Любой блок РЭС с точки зрения теплофизики представляет собой систему многих тел с источниками тепловой энергии, сложным образом распределенными в пространстве конкретного корпуса. Внутреннее тепловыделение в совокупности с тепловым воздействием окружающей среды вызывает изменение физических и электрических характеристик РЭС. Эти изменения могут быть обратимыми или необратимыми, незначительными или существенными, а в критических ситуациях могут вызвать даже отказ устройства. Поэтому при проектировании РЭС ставится задача обеспечения допустимого теплового режима, то есть для всех электронных компонентов должно выполняться условие границ работоспособности в рабочем диапазоне температур окружающей среды в течение всего периода эксплуатации и при всех возможных режимах работы устройства.

Для обеспечения допустимого теплового режима на этапе проектирования РЭС проводятся расчеты, в которых учитываются характеристики самого устройства, полупроводниковых приборов, входящих в состав его конструкции, а также макроклиматические условия эксплуатации. В результате проведения расчетов можно спрогнозировать температурные показатели устройства и его элементов для тех или иных способов охлаждения и реализаций корпуса.

На сегодняшний день существует большое число работ в области исследования моделей и алгоритмов расчета элементов охлаждения полупроводниковых приборов при эксплуатации в различных макроклиматических районах. Наиболее значимые результаты были получены российскими и белорусскими учеными, которые проводили исследования в области теплообмена в РЭС (Л.Л. Роткоп, Ю.Е. Спокойный, Г.Н. Дульнев, Э.М. Семяшкин, В.Ф. Алексеев, Г.А. Пискун и др.).

Основным недостатком используемых на практике расчетов является их энергозатратность и массивность. В связи с этим целесообразно реализовать автоматический подбор оптимального теплового режима устройства путем разработки моделей и алгоритмов для проведения таких расчетов.

Автоматизация расчетов позволит ускорить процесс подбора оптимального теплового режима, а также минимизировать вероятность возникновения человеческой ошибки, повышая качество и достоверность полученных данных. Реализация данного функционала в виде веб-приложения, написанного на языке *JavaScript*, позволит увеличить его доступность, благодаря возможности использования на большинстве современных платформ и операционных

систем. Веб-приложение также содержит справочную информацию по теме исследования в интерактивном виде. Оно выполнено по технологии *Progressive Web Application* (далее – *PWA*) и использует интегрированную в браузер базу данных (далее – БД) *IndexedDB*, благодаря чему может работать без подключения к сети Интернет после установки на устройство пользователя.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Современные требования к разработке РЭС строятся на необходимости правильного выбора типа охлаждения на этапе проектирования устройства. Исследования в области автоматизации расчетов элементов охлаждения полупроводниковых приборов начали проводиться сравнительно недавно и большинство инструментов, предлагающих данный функционал, тяжеловесны и сложны в освоении (например, АСОНИКА-ТМ, *Ansys*, *Mentor Graphics* и *COMSOL Multiphysics*).

В связи с вышесказанным, актуальной является разработка доступного веб-приложения, оснащенного моделями и алгоритмами для автоматизированного расчета элементов охлаждения полупроводниковых приборов при эксплуатации в различных макроклиматических районах.

Степень разработанности проблемы

Исследование в области разработки моделей и алгоритмов автоматизированного расчета элементов охлаждения полупроводниковых приборов при эксплуатации в различных макроклиматических районах проводилось с использованием работ российских и белорусских ученых: Л. Л. Роткоп, Ю.Е. Спокойный, Г.Н. Дульнев, Э.М. Семяшкин, В.Ф. Алексеев, Г.А. Пискун и др.

Одним из недостатков исследований, представленных в современной технической литературе, является неполное рассмотрение особенностей и условий создания моделей и алгоритмов для автоматизации данного расчета.

Предложенное исследование направлено на устранение этого недостатка на основе модификации моделей и алгоритмов автоматизированного расчета оптимального теплового режима РЭС.

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является разработка моделей и алгоритмов, позволяющих провести автоматизированный расчет теплового режима РЭС при эксплуатации в различных макроклиматических районах.

Поставленная цель работы определяет **следующие основные задачи:**

1. Провести обзор и анализ существующих моделей и алгоритмов подбора оптимального теплового режима РЭС.

2. Разработать модели и алгоритмы автоматизированного расчета элементов охлаждения полупроводниковых приборов при эксплуатации в различных макроклиматических районах.

3. Экспериментально доказать эффективность разработанных моделей и алгоритмов.

Область исследования

Содержание диссертации соответствует образовательному стандарту высшего образования второй ступени (магистратуры) ОСВО 1-39 80 03-2019 специальности 1-39 80 03 Электронные системы и технологии (профилизация «Компьютерные технологии проектирования электронных систем»).

Теоретическая и методологическая основа исследования

В основу диссертации легли работы белорусских и зарубежных ученых в области исследования моделей и алгоритмов автоматизированного расчета элементов охлаждения полупроводниковых приборов при эксплуатации в различных макроклиматических районах, а также анализ технических нормативных правовых актов по рассматриваемой тематике.

Информационная база исследования сформирована на основе литературы, открытой информации, технических нормативно-правовых актов, сведений из электронных ресурсов, а также материалов научных конференций и семинаров.

Научная новизна, теоретическая и практическая значимость

Научная новизна и значимость полученных результатов работы заключается в разработке моделей и алгоритмов автоматизированного расчета элементов охлаждения полупроводниковых приборов при эксплуатации в различных макроклиматических районах.

Теоретическая значимость работы заключается в детальном анализе существующих методов расчета оптимального теплового режима РЭС.

Практическая значимость диссертации состоит в разработанной модели расчета теплового режима РЭС, представленной в виде веб-приложения на языке *JavaScript*.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Алгоритмы автоматизированного расчета элементов охлаждения полупроводниковых приборов при эксплуатации в различных макроклиматических районах и взаимодействия элементов расчета с интегрированным в браузер клиентским хранилищем большого объема структурированных данных *IndexedDB*.

2. Модели взаимодействия между функциональными компонентами программы в процессе расчета, основанное на принципе *Model-View-Component*, и управления данным процессом при помощи элементов пользовательского интерфейса.

3. Веб-приложение, основанное на технологии *Progressive Web Application* с использованием генератора *DocuSaurus*, включающее в себя раздел с результатами проведенных расчетов, которые были сохранены пользователем, а также разделы «Расчет» и «Справочник».

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Результаты исследований, вошедшие в диссертацию, докладывались и обсуждались на 59-ой научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (г. Минск, Беларусь, 2023 год), 60-ой научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (г. Минск, Беларусь, 2024 год), 9-ой международной научно-практической конференции *BIG DATA and Advanced Analytics* (г. Минск, Беларусь, 2023 год), 10-ой международной научно-практической конференции *BIG DATA and Advanced Analytics* (г. Минск, Беларусь, 2024 год).

Отдельные положения диссертации могут быть использованы при преподавании дисциплины «Физические основы проектирования радиоэлектронных средств».

Публикации

Изложенные в диссертации основные положения и выводы опубликованы в 7 печатных работах. В их числе 7 статей в сборниках материалов научных конференций.

Общий объем публикаций по теме диссертации составляет 39 страниц.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, трех глав с краткими выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и приложений.

В первой главе дана характеристика нормального теплового режима РЭС, а также приведен обзор существующих методик расчета элементов охлаждения полупроводниковых приборов.

Во второй главе представлено обоснование актуальности автоматизации расчета и целесообразности использования языка *JavaScript* для разработки соответствующих алгоритмов, описаны разработанные алгоритмы для

проведения автоматизированного расчета элементов охлаждения полупроводниковых приборов и взаимодействия элементов расчета с интегрированной в браузер БД *IndexedDB*.

В третьей главе представлена архитектура разработанного веб-приложения, позволяющего провести расчет тепловых характеристик полупроводниковых приборов и предоставляющего интерактивный справочник по данной теме, модели взаимодействия между функциональными компонентами приложения и управления процессом расчета с помощью кнопок. Описан процесс проведения нагрузочного тестирования веб-приложения, а также анализ его результатов.

В приложении представлены публикации автора, акт внедрения в учебный процесс, листинг кода скрипта для отправки на разные кафедры и справка о проверке на антиплагиат.

Общий объем диссертационной работы составляет 128 страниц. Из них 54 страницы основного текста, 24 иллюстраций на 21 странице, библиографический список из 49 наименований на 4 страницах, список собственных публикаций соискателя из 7 наименований на 2 страницах, 5 приложений на 65 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе приведена характеристика нормального теплового режима РЭС и обзор методов расчета элементов охлаждения полупроводниковых приборов, для которых в рамках диссертационного исследования были разработаны алгоритмы автоматизации.

Расчет по данным методам разделяется на два этапа:

1 Предварительная оценка оптимального способа охлаждения РЭС

На данном этапе происходит оценка вероятности обеспечения заданного по техническому заданию (далее – ТЗ) теплового режима РЭС при выбранном способе охлаждения, а также те усилия, которые нужно затратить при разработке будущей конструкции РЭС с учетом обеспечения теплового режима.

Для этого необходимо рассчитать величины плотности теплового потока, проходящего через поверхность теплообмена q , а также минимально допустимый перегрев элементов РЭС ΔT_c .

В качестве аргументов используются величины, как правило указанные в ТЗ на устройство.

Рассчитанные значения используются в качестве координат на графике областей целесообразного применения различных способов охлаждения, а также на вероятностных кривых, на основе которых можно получить рекомендацию к использованию того или иного способа охлаждения.

2 Расчет теплового режима РЭС

На данном этапе проводится расчет теплового режима блоков, стоек и других подобных узлов РЭС, в состав которых входят полупроводниковые приборы. Расчет проводится для рекомендованного на первом этапе способа охлаждения.

В виду особенностей использования испарительного и жидкостного охлаждения автоматизация расчетов для этих способов нецелесообразна, поэтому на данном этапе рассматривается только воздушное охлаждение.

Для расчета используются параметры устройства, заданные в ТЗ и параметры рассматриваемого блока из полупроводниковых приборов либо одного полупроводникового элемента, также могут вводиться дополнительные параметры в зависимости от рассматриваемого способа охлаждения, к примеру: площадь перфорационных отверстий S_{Π} для воздушного охлаждения в перфорированном корпусе.

В результате расчета могут быть получены значения температур следующих составляющих РЭС:

- нагретой зоны T_3 ;
- поверхности элемента $T_{эл}$;
- средняя температура воздуха в блоке T_B ;
- среды, окружающей блок $T_{эс}$;
- корпуса блока T_k (только при естественном охлаждении);
- воздуха на выходе из блока T_{B2} (только при принудительном охлаждении).

Как правило, определение оптимального способа охлаждения устройства не ограничивается расчетом для одного блока, а требует повторения данной операции для всех блоков, входящих в него, т.е. оптимальным для устройства в целом будет тот способ охлаждения, который является оптимальным для каждого рассматриваемого блока.

Чем сложнее конструкция устройства, тем большее количество расчетов для выбора способа охлаждения необходимо провести, что может стать достаточно трудоемкой задачей, а цена ошибки на данном этапе велика. В связи с этим целесообразной является задача автоматизации расчета элементов охлаждения.

Во второй главе представлено обоснование актуальности автоматизации расчета и целесообразности использования языка *JavaScript* для разработки соответствующих алгоритмов, а также описание разработанных алгоритмов.

Алгоритм проведения расчета представлен на рисунке 1.

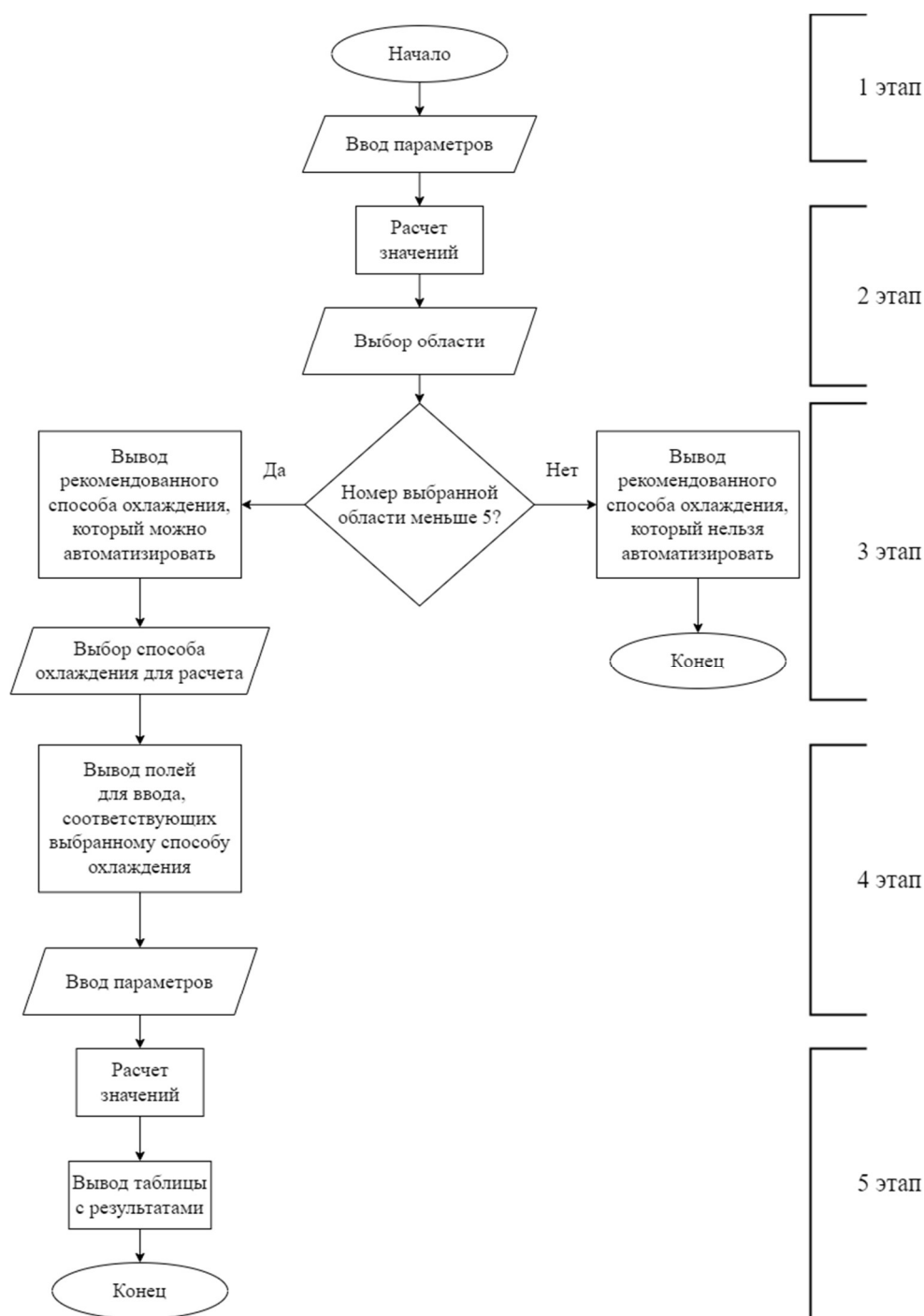


Рисунок 1 – Алгоритм проведения расчета

Данный алгоритм включает в себя следующие этапы:

На первом этапе пользователь вводит параметры устройства и блока, указанные в ТЗ.

На втором этапе происходит расчет параметров на основании введенных значений, по которым пользователь выбирает область целесообразного применения тех или иных способов охлаждения.

На третьем этапе в случае, если номер выбранной на предыдущем этапе области не меньше 5, расчет прекращается, так как его автоматизация для соответствующих способов охлаждения невозможна. Если же номер меньше 5,

пользователь выбирает для какого способа охлаждения проводить дальнейший расчет.

На четвертом этапе в зависимости от выбранного способа охлаждения пользователь вводит параметры необходимые для дальнейшего расчета.

На пятом этапе рассчитываются и выводятся итоговые результаты в виде таблицы со значениями температур различных частей блока и устройства.

На рисунке 2 представлен алгоритм взаимодействия приложения с БД при открытии раздела «Расчет».



Рисунок 2 – Алгоритм взаимодействия приложения с БД при открытии раздела «Расчет»

В третьей главе представлено описание архитектуры разработанного веб-приложения для автоматизации расчета элементов охлаждения полупроводниковых приборов при эксплуатации в различных макроклиматических районах, а также изучения теоретической информации по теме. Также описаны модели взаимодействия между функциональными компонентами программы в процессе расчета и управления процессом расчета с помощью кнопок.

В качестве шаблона для разработки и использования приложения используется генератор статических сайтов открытого доступа *DocuSaurus*. Он предоставляет инструменты для создания документации, а также содержит в своей основе *JavaScript*-фреймворк *React*, позволяющий разрабатывать *SPA* (*Single Page Application*).

SPA или одностраничное приложение – это тип приложения, использующее единственный *HTML*-документ как оболочку для всех веб-страниц, который динамически изменяется с помощью *JavaScript*.

Приложение было разработано по технологии *PWA* для возможности пользоваться им как обычным веб-сайтом с помощью браузера, так и как установленной на устройство пользователя программой, не требующей подключения к сети Интернет.

Модель взаимодействия между компонентами в разделе «Расчет» выполнена по шаблону *Model-View-Controller* и представлена на рисунке 3.

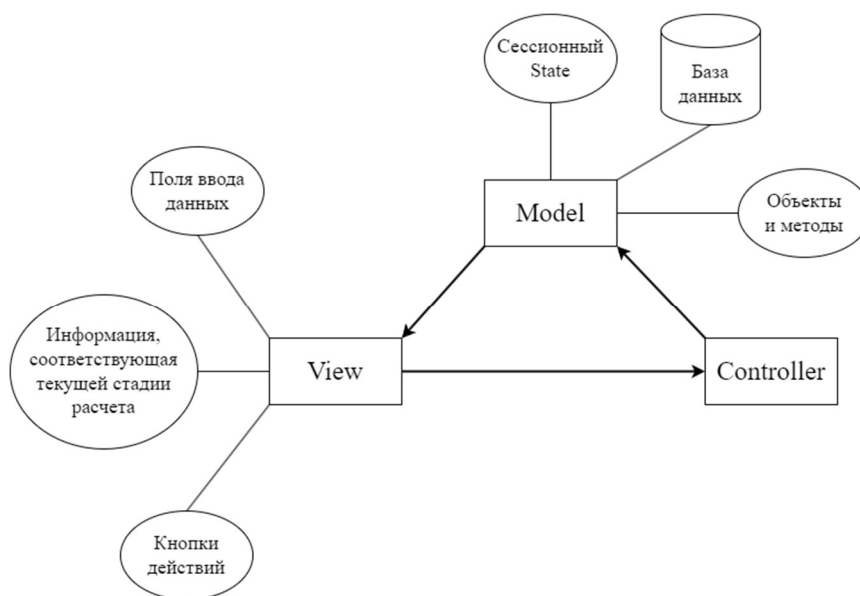


Рисунок 3 – Модель взаимодействия между компонентами, используемая в разделе «Расчет»

Управление процессом расчета происходит с помощью кнопок: «Далее», «Назад», «Сбросить» и «Сохранить». На рисунке 4 изображена модель управления процессом расчета.

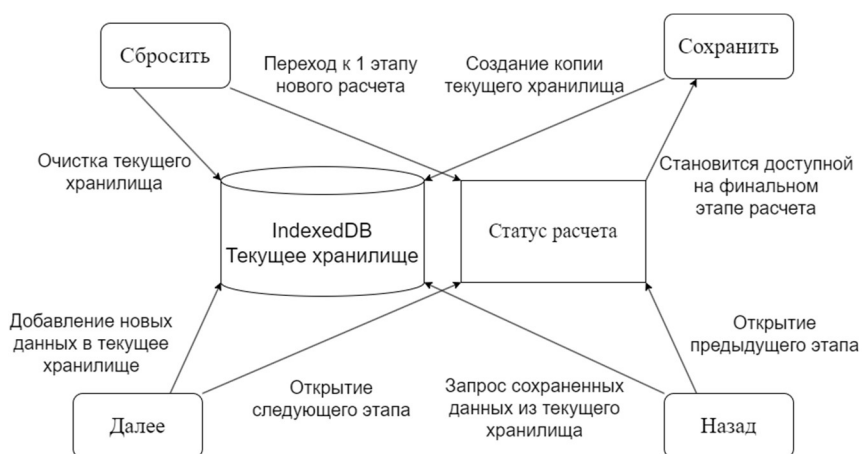


Рисунок 4 – Модель управления процессом расчета

Результаты тестирования производительности веб-приложения с помощью нагрузочного теста из 100 одновременно подключенных виртуальных пользователей с использованием инструмента *Grafana k6* указывают, что приложение соответствует современным стандартам надежности и быстродействия, т.к. количество неудачных *HTTP*-запросов равняется 0, а среднее время создания *TCP*-подключения и среднее время обработки *HTTP*-запроса составляют 47,56 и 91,46 мс соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Выполнен анализ существующих моделей и алгоритмов расчета элементов охлаждения полупроводниковых приборов при эксплуатации в различных макроклиматических районах. Выявлено, что в настоящее время в отечественных и зарубежных источниках недостаточно освещен вопрос разработки моделей и алгоритмов автоматизации данных расчетов [1].

2. Разработаны алгоритмы и модели автоматического расчета элементов охлаждения полупроводниковых приборов при эксплуатации в различных макроклиматических районах на языке программирования *JavaScript* [2 – 4].

3. В результате разработанных моделей и алгоритмов было создано веб-приложение, которое позволяет провести расчет теплового режима РЭС, а также предоставляющего интерактивный справочник по теме [5 – 7].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Представленные результаты позволяют уменьшить время подбора оптимального теплового режима РЭС, а также сделать данный процесс более доступным и нетребовательным к техническому обеспечению за счет реализации в виде веб-приложения.

2. Интегрированный справочник может быть использован в качестве методического материала для обучения.

3. Результаты внедрены в учебный процесс на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» в учебный курс «Физические основы проектирования радиоэлектронных средств» в качестве лекционного материала для студентов специальностей 1-39 02 01 «Моделирование и компьютерное проектирование радиоэлектронных средств».

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи в сборниках научных трудов

1. Воронко, Т. М. Расчет и моделирование теплового режима паяльной станции на микроконтроллере Atmega4809 / Т. М. Воронко // Электронные системы и технологии: сборник материалов 59-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР. – Минск, 2023. – С. 107–111.
2. Воронко, Т. М. Основные языки программирования для создания математических моделей и анализа данных технических решений / Т. М. Воронко // Электронные системы и технологии: сборник материалов 60-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР. – Минск, 2024.
3. Воронко, Т. М. Python-библиотека для решения математических задач SCIPY / Т. М. Воронко // Электронные системы и технологии: сборник материалов 60-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР. – Минск, 2024.
4. Воронко, Т. М. Актуальность использования языка javascript для разработки моделей машинного обучения / Т. М. Воронко, В. Ф. Алексеев, Г. А. Пискун // BIG DATA and Advanced Analytics: сборник научных статей IX Международной научно- практической конференции. – Минск, 2023. – С. 432-438.
5. Воронко, Т. М. Обзор программной платформы Apache Hadoop для обработки и хранения больших данных / Т. М. Воронко, В. Ф. Алексеев, Г. А. Пискун // BIG DATA and Advanced Analytics: сборник научных статей IX Международной научно- практической конференции. – Минск, 2023. – С. 465-471.
6. Voronko, T. M. Progressive Web Applications as means of increasing web services functionality / T. M. Voronko, V. F. Alekseev, G. A. Piskun // BIG DATA and Advanced Analytics: сборник научных статей X Международной научно-практической конференции. – Минск, 2024. – С. 486-492.
7. Воронко, Т. М. Генератор одностраничных веб-приложений для автоматизации создания документации Docusaurus / Т. М. Воронко, В. Ф. Алексеев, Г. А. Пискун // BIG DATA and Advanced Analytics: сборник научных статей X Международной научно- практической конференции. – Минск, 2024. – С. 293-300.

РЭЗІЮМЭ

Варанко Цімафей Максімавіч

Мадэлі і алгарытмы аўтаматызаванага разліку элементаў астуджэння паўправадніковых прыбораў пры эксплуатацыі ў розных макراكліматычных раёнах

Ключавыя словы: радыёэлектронны сродак, цеплавы рэжым.

Мэта працы: распрацоўка мадэляў і алгарытмаў, якія дазваляюць правесці аўтаматызаваны разлік цеплавога рэжыму РЭС пры эксплуатацыі ў розных макракліматычных раёнах.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: выкананы аналіз існуючых мадэляў і алгарытмаў разліку элементаў астуджэння паўправадніковых прыбораў пры эксплуатацыі ў розных макракліматычных раёнах. Выяўлена, што цяпер у айчынных і замежных крыніцах недастаткова асветлена пытанне распрацоўкі мадэлей і алгарытмаў аўтаматызацыі гэтых разлікаў; распрацаваны алгарытмы і мадэлі аўтаматычнага разліку элементаў астуджэння паўправадніковых прыбораў пры эксплуатацыі ў розных макракліматычных раёнах на мове праграмавання JavaScript; у выніку распрацаваных мадэляў і алгарытмаў быў створаны вэб-дадатак, які дазваляе правесці разлік цеплавога рэжыму РЭС, а таксама прадстаўляе інтэрактыўны даведнік па тэме.

Ступень выкарыстання: вынікі ўкаранены ў навучальны працэс на кафедры праектавання інфармацыйна-камп'ютэрных сістэм ўстанова адукацыі «Беларускі дзяржаўны ўніверсітэт інфарматыкі і радыёэлектронікі» ў навучальны курс «Фізічныя асновы праектавання радыёэлектронных сродкаў».

Вобласць ужывання: радыёэлектронная прамысловасць, аўтаматызаванае праектаванне.

РЕЗЮМЕ

Воронко Тимофей Максимович

Модели и алгоритмы автоматизированного расчета элементов охлаждения полупроводниковых приборов при эксплуатации в различных макроклиматических районах

Ключевые слова: радиоэлектронное средство, тепловой режим.

Цель работы: разработка моделей и алгоритмов, позволяющих провести автоматизированный расчет теплового режима РЭС при эксплуатации в различных макроклиматических районах.

Полученные результаты и их новизна: выполнен анализ существующих моделей и алгоритмов расчета элементов охлаждения полупроводниковых приборов при эксплуатации в различных макроклиматических районах. Выявлено, что в настоящее время в отечественных и зарубежных источниках недостаточно освещен вопрос разработки моделей и алгоритмов автоматизации данных расчетов; разработаны алгоритмы и модели автоматического расчета элементов охлаждения полупроводниковых приборов при эксплуатации в различных макроклиматических районах на языке программирования *JavaScript*; в результате разработанных моделей и алгоритмов было создано веб-приложение, которое позволяет провести расчет теплового режима РЭС, а также предоставляющего интерактивный справочник по теме.

Степень использования: результаты внедрены в учебный процесс на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» в учебный курс «Физические основы проектирования радиоэлектронных средств».

Область применения: радиоэлектронная промышленность, автоматизированное проектирование.

SUMMARY

Voronko Timofei Maksimovich

**Models and algorithms for automated calculations
of semiconductor cooling elements
devices during operation in various
macroclimatic areas**

Keywords: radio-electronic means, thermal mode.

The object of study: development of models and algorithms that allow automated calculation of the thermal regime of radio-electronic means during operation in various macroclimatic regions.

The results and novelty: an analysis of existing models and algorithms for calculating cooling elements of semiconductor devices during operation in various macroclimatic regions was carried out. It has been revealed that at present the issue of developing models and algorithms for automating these calculations is not sufficiently covered in domestic and foreign sources; algorithms and models for automatic calculation of cooling elements of semiconductor devices during operation in various macroclimatic regions were developed using the JavaScript programming language; as a result of the developed models and algorithms, a web application was created that allows you to calculate the thermal regime of the radio-electronic means, as well as providing an interactive reference book on the topic.

Degree of use: the results implemented in the educational process at the department of design information and computer systems educational institution «Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics» in the training course «Physical fundamentals of the design of radio-electronic means».

Sphere of application: radio-electronic industry, computer-aided design.