

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

На правах рукописи

Васильев Иван Михайлович

**ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОПРОВОДЯЩЕЙ ПАСТЫ
(ТЕРМОИНТЕРФЕЙСА)**

2.2.8 – «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ
и природной среды»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор А. И. Солдатов

Томск – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1 ОБЗОР СОСТОЯНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМОИНТЕРФЕЙСА	12
1.1. Обзор термоинтерфейсов	16
1.2. Методы обеспечения требуемых теплофизических параметров термоинтерфейса при установке тепловыделяющего элемента на радиатор охлаждения.....	30
1.3. Методы контроля качества термоинтерфейса	34
ВЫВОДЫ	49
ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МЕТОДА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМОИНТЕРФЕЙСА	50
2.1. Теоретические основы применения термоэлектрического метода для контроля теплофизических параметров термоинтерфейса	50
2.2. Разработка модели для исследования термоЭДС при контроле теплофизических параметров термоинтерфейса	55
2.3. Исследование распределения температурного поля в объекте контроля при изменении теплового сопротивления термоинтерфейса	63
2.4. Описание модели для исследования влияния теплового сопротивления термоинтерфейса на термоЭДС.....	67
2.5. Исследование влияния теплового сопротивления термоинтерфейса на термоЭДС.....	70
ВЫВОДЫ	81
ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМОИНТЕРФЕЙСА НА ТЕРМОЭДС	82
3.1. Экспериментальная установка для исследования теплового сопротивления лабораторных образцов.....	82

3.2 Экспериментальные исследования зависимости термоЭДС от теплового сопротивления.....	89
3.3 Экспериментальные исследования зависимости термоЭДС от площади покрытия процессора персонального компьютера термоинтерфейсом.....	95
ВЫВОДЫ	116
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	117
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	118
ПРИЛОЖЕНИЕ А. АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ	127
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. АКТ ВНЕДРЕНИЯ РАЗРАБОТКИ В УЧЕБНЫЙ ПРОЦЕСС ТПУ	128

Актуальность работы

В современной технике повсеместно применяется теплопроводящая паста, получившая еще одно название – термоинтерфейс, задача которого улучшить качество теплопереноса от греющегося элемента к радиатору охлаждения. Дефекты, появившиеся после нанесения теплопроводящей пасты на радиатор охлаждения, могут привести к негативным последствиям, таким как снижение производительности и срок службы силового элемента, ложного срабатывания цепей защиты от перегрева и пр. Поэтому своевременный контроль теплофизических характеристик теплопроводящей пасты позволяет избежать снижения надёжности работы прибора и системы в целом, а так же его преждевременного отказа.

В настоящее время контроль теплофизических характеристик термоинтерфейса в процессе производства осуществляется вручную [5, 10, 21, 82], либо косвенными методами [66, 89], а контроль теплофизических характеристик термоинтерфейса после его нанесения на теплоотводящую поверхность существующими методами проводится только на этапе летучего и выборочного контроля [28]. Выходной контроль теплофизических характеристик термоинтерфейса в некоторых случаях возможен, но для его осуществления исследуемый прибор должен иметь температурозависимый параметр, а полученные данные о теплофизических характеристиках термоинтерфейса зависят так же и от косвенных параметров изделия, например таких, как шероховатость сопрягаемых поверхностей и теплоемкость корпуса [63, 93]. Существующие методы неразрушающего контроля, не позволяют контролировать теплофизические характеристики термоинтерфейса после установки тепловыделяющего элемента на радиатор охлаждения с термоинтерфейсом в автоматическом режиме, а так же исключить влияние других факторов тепловой схемы исследуемого прибора.

Исследования теплофизических характеристик термоинтерфейса в промежутке между корпусом тепловыделяющего элемента и радиатором охлаждения активно проводятся различными авторами и коллективами. Наиболее полно исследование одного из теплофизических параметров термоинтерфейса, теплового сопротивления, с помощью неразрушающего контроля описано в работе [65]. На основе частотного анализа электротеплового аналога RC-цепи второго порядка получено выражение для определения вклада в тепловое сопротивление каждого элемента тепловой конструкции, имеющего значительную теплоемкость. Однако использование данного метода имеет такой недостаток как невозможность его применения при выключенном приборе, либо на приборе, не имеющем температурозависимый параметр. Так же данный метод имеет высокую погрешность при существенно отличающихся параметрах элементов одной тепловой схемы.

В результате литературного анализа было выявлено, что на сегодняшний день исследования характера изменения термоЭДС между разнородными поверхностями корпуса тепловыделяющего элемента и радиатором охлаждения при разных теплофизических параметрах термоинтерфейса не проводились. Возможно использование полученных данных о величине термоЭДС для определения теплофизических характеристик термоинтерфейса в промежуточном слое между корпусом тепловыделяющего элемента и радиатором охлаждения. Для исследования был выбран корпус ТО-220, повсеместно применяемый в полупроводниковой технике, и термопаста КПТ-8 – широко применяемая в отечественной радиоэлектронике. Так же проведены экспериментальные исследования по определению зависимости термоЭДС от толщины термоинтерфейса между процессором компьютера Intel core 2 Duo и его штатным радиатором охлаждения. В качестве термоинтерфейса применялась паста Элсил 131–179.

Объектом исследования в представленной работе является термоЭДС, возникающая между разнородными металлическими поверхностями радиатора и тепловыделяющего элемента.

Предметом исследования является способ контроля теплофизических параметров термоинтерфейса термоэлектрическим методом.

Цель диссертационной работы: исследование термоэлектрического метода для контроля параметров термоинтерфейса после его установки с тепловыделяющим элементом на радиатор охлаждения.

Данные цели достигаются путем решения следующих **задач:**

1. Определить зависимость возникающей термоЭДС между разнородными образцами из типовых материалов, применяемых при изготовлении корпусов силовых приборов и радиаторов охлаждения, от характера распределения термоинтерфейса по поверхности образцов.

2. Провести исследования электрических характеристик возникающей термоЭДС.

3. Разработать термоэлектрический метод контроля теплофизических параметров термоинтерфейса после установки тепловыделяющего элемента на радиатор охлаждения с теплопроводящей пастой.

Научная новизна работы. В качестве результатов работы можно выделить следующие новые научные знания:

1. Предложен способ термоэлектрического контроля теплофизических характеристик термоинтерфейса, основанный на зависимости термоЭДС от характера распределения теплопроводящей пасты между двумя металлическими поверхностями, защищенный патентом РФ № 2686859

2. Исследован характер возникновения термоЭДС между разнородными образцами из типовых материалов, применяемых при изготовлении корпусов тепловыделяющих элементов и радиаторов охлаждения и получены аналитические выражения для определения термоЭДС, позволяющие учитывать характер распределения термоинтерфейса между корпусом тепловыделяющего элемента и радиатором охлаждения.

3. Разработана модель для исследования теплофизических характеристик термоинтерфейса, расположенного между двумя металлическими поверхностями,

позволяющая проводить исследования в широком диапазоне изменения различных параметров металлических поверхностей и термоинтерфейса.

4. Проведены исследования электрических свойств возникающей термоЭДС при различном характере распределения термоинтерфейса между образцами, выявлена линейная зависимость термоЭДС от площади покрытия термоинтерфейсом корпуса тепловыделяющего элемента.

Практическая значимость.

1. Полученные аналитические выражения для определения величины термоЭДС могут быть использованы для оценки характера распределения термоинтерфейса между корпусом силового прибора и радиатором охлаждения.

2. Предложенный способ термоэлектрического контроля позволяет определить теплофизические характеристики термоинтерфейса, расположенного между металлическими поверхностями, между которыми при нагреве возникает термоЭДС, на любом этапе эксплуатации прибора.

3. Результаты работы внедрены в учебный процесс в национальном исследовательском Томском политехническом университете и на предприятии ООО «ЛЭМЗ-Т».

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Термоэлектрический метод позволяет контролировать теплопроводящие характеристики термоинтерфейса в промежуточном слое между радиатором охлаждения и корпусом тепловыделяющего элемента.

2. Разработанная модель на основе термоэлектрического метода, позволяет контролировать теплофизические параметры термоинтерфейса в промежуточном слое между радиатором охлаждения и корпусом тепловыделяющего элемента в широком диапазоне изменения различных параметров теплопроводящей пасты, радиатора охлаждения и корпуса тепловыделяющего элемента.

3. ТермоЭДС в установившемся режиме между корпусом силового элемента ТО220 с медным никелированным основанием и радиатором охлаждения из алюминиевого сплава марки АД31 линейно уменьшается от 40 до 20 мкВ при изменении площади покрытия тепловыделяющего элемента термоинтерфейсом

КТП-8 от 0 до 100% при температуре радиатора охлаждения 100°C. Погрешность определения площади не превышает 10%.

Достоверность полученных теоретических и экспериментальных исследований обеспечивается корректным применением современных численных методов, многочисленными экспериментальными исследованиями, высокой повторяемостью результатов и сопоставлением результатов, полученных при аналитическом расчете, а также практическим применением способа контроля теплофизических параметров термоинтерфейса для обнаружения образцов с некачественно нанесенным термоинтерфейсом.

Вклад автора: постановка целей и задач, разработка математической модели для исследования теплопроводящих характеристик термоинтерфейса. Предложен термоэлектрический способ контроля теплофизических характеристик термоинтерфейса, располагающегося между корпусом тепловыделяемого элемента и радиатором охлаждения, его экспериментальная проверка на лабораторных образцах и реальных приборах. Проведены исследования возникающей термоЭДС при различном характере распределения термоинтерфейса между двумя металлическими образцами. На предложенный способ и экспериментальную установку получены патенты РФ

Апробация работы и публикации.

Приведенные в данной диссертационной работе материалы представлены на следующих конференциях:

XXIII Международная научно–практическая конференция, посвященная памяти генерального конструктора ракетно–космических систем академика М. Ф. Решетнева «Решетневские чтения», г. Красноярск, 2019 г.

XV Международная школа–конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Инноватика – 2019», г. Томск, 2019 г.

XIII Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации», г. Новосибирск, 2019 г.

Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «НАУЧНАЯ СЕССИЯ ТУСУР – 2020», г. Томск, 2020 г.

XX Научно-техническая конференция «Электронные и электромеханические системы и устройства», г. Томск, 2020 г.

III Международный форум «Интеллектуальные системы 4-й промышленной революции», г. Томск, 2020 г.

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 13 печатных работах, в том числе одна статья в журнале из перечня ВАК и две статьи в журналах, индексируемых в Scopus, одна публикация в журнале из перечня WoS, 7 публикаций индексируемых в РИНЦ, получено 2 патента РФ.

Структура диссертации. Настоящая диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Объем диссертации составляет 1286 страниц, 68 рисунков и 6 таблиц. Обзор литературных данных включает в себе 98 источников.

Во введении приведено обоснование актуальности работы, поставлены цели диссертационной работы, показывается практическая ценность работы, излагаются научные результаты.

В первой главе приведены основные типы и виды термоинтерфейсов, их основные параметры, сравнительный анализ каждого типа и примеры их применения при монтаже электронной аппаратуры.

Рассмотрены основные методы обеспечения качества нанесения пастообразных термоинтерфейсов, показаны основные области применения, описаны их достоинства и недостатки. Приведены методы контроля теплофизических параметров термоинтерфейсов: такие как контроль температурозависимого параметра, стандартный метод контроля теплового сопротивления, модуляционный метод и метод определения компонент теплового сопротивления. Описаны их основные сферы применения, этапы производства, на котором они могут применяться, а так же их достоинства и недостатки.

Опираясь на результаты литературного анализа, был предложен термоэлектрический метод контроля теплофизических параметров термоинтерфейса в промежутке между корпусом тепловыделяющего элемента и радиатором охлаждения.

Во второй главе приведены результаты теоретических исследований передачи тепла при изменении теплового сопротивления, который является одним из основных теплофизических параметров термоинтерфейса, системы «корпус–термоинтерфейс–радиатор». В разделе 2.1 получена аналитическая зависимость возникающей термоЭДС от теплового сопротивления.

В разделе 2.2 приведены основные уравнения математической модели, позволяющей качественно определить влияние теплового сопротивления на процесс передачи тепла в объекте при введении теплового сопротивления.

В разделе 2.3 приведены результаты исследования влияния параметров объекта на термоЭДС. Показано изменение термоЭДС при изменении теплопроводности термоинтерфейса, его толщины и параметров исследуемого объекта.

В разделе 2.4 приведены основные функциональные возможности математической модели, реализованной на соотношениях полученных в разделе 2.3. Приведены зависимости термоЭДС от типов используемых материалов в математической модели, размеров объектов и толщины термоинтерфейса.

В разделе 2.5 приведено исследование влияния теплового сопротивления термоинтерфейса на термоЭДС при различных свойствах материалов исследуемых объектов.

Во третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований. В разделе 3.1 приведено описание экспериментальной установки для исследования теплофизических параметров термоинтерфейса. В качестве объекта исследования использовался лабораторный образец, схожий своими физическими свойствами с образцом, примененным в качестве объекта исследования в математической модели, описанной в предыдущей главе. Приведены графики разницы температур от времени нагрева, измеренного термопарами, и измеренные с помощью термоЭДС, подтверждающие правильность термоэлектрического метода. Графики позволяют наглядно увидеть процесс теплопередачи при введении теплового сопротивления, флуктуации температуры и результирующей термоЭДС.

В разделе 3.2 приведено описание экспериментальной установки для определения зависимости термоЭДС от толщины термоинтерфейса и площади покрытия корпуса ТО–220. Приведены графики разницы температур от времени нагрева, измеренного термопарами, и измеренные с помощью термоЭДС, подтверждающие правильность термоэлектрического метода. Получена линейная зависимость термоЭДС от площади покрытия корпуса ТО–220 термоинтерфейсом.

В разделе 3.3 приведены результаты экспериментальных исследований зависимости термоЭДС от площади покрытия термоинтерфейсом корпуса процессора персонального компьютера. Получена линейная зависимость термоЭДС от площади покрытия термоинтерфейсом корпуса процессора.

В конце каждой главы приведены выводы.

В заключении приведены основные научные знания, представленные в виде результатов диссертационной работы.

ГЛАВА 1 ОБЗОР СОСТОЯНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМОИНТЕРФЕЙСА

Перегрев полупроводниковых приборов может привести к негативным последствиям, например снижению производительности, надёжности работы прибора или же его отказу. На сегодняшний день большинство мощной полупроводниковой техники используется в паре с радиатором, позволяющем отвести от полупроводникового прибора часть выделяемой мощности в виде тепла.

Процессоры для персональных компьютеров современного поколения обладают высокой удельной мощностью. Так, например, процессор Intel Core i9-9900KF, являющейся последней разработкой в сфере процессоров для персональных компьютеров на 2020 год при полной загрузке ядер потребляет 95 Вт [57], при размере корпуса 37,5x37,5 мм. В документации на данный процессор указано, что его нельзя использовать без системы теплоотведения. Так же, для пользователей приведена рекомендуемая система охлаждения – PСG 2015D. Она представляет собой радиатор 30x30x10 см, представляющий собой алюминиевую решётку с системой крепления процессора в корпусе Socket 1151 через медные трубки. К этой конструкции на специальное крепление присоединён вентилятор охлаждения (рисунок 1). Радиатор крепится основанием непосредственно к крышке процессора прижимной скобой, которая в свою очередь крепится к материнской плате. Данный тип крепления наиболее распространен при использовании воздушных систем охлаждения и обладает простотой установки даже при ограниченном пространстве системного блока. Однако даже опытный пользователь может допустить ошибку при установке, и простое несоблюдение режима затяжки винтов в одной точке крепления может привести к увеличению теплового сопротивления тепловой схемы «радиатор-термоинтерфейс-корпус» и как следствие – перегрев процессора, что негативно влияет на структуру полупроводниковой техники.



Рисунок 1. Система теплоотведения PCG 2015D

Среди процессоров линейки AMD, лидером по производительности на 2020 год является процессор Ryzen 7 3700X. Его типовая мощность потребления 65 Вт, однако результаты стресс тестов показывают, что при должном теплоотводе, он способен длительное время работать при мощности 105 Вт [94]. Согласно спецификации на процессор, рекомендуемая система охлаждения для него – AMD Wraith Prism. Данная система отличается от PCG 2015D направлением потока воздуха вентилятора и размером радиатора. Данная система предназначена для процессоров с сокетом AM4. Система AMD Wraith Prism приведена на рисунке 2. В данной системе прижим обеспечивается регулируемой скобой через винтовое соединение.

Рекомендуемые производителями процессоров системы охлаждения, приведённые выше, являются воздушными системами охлаждения, принцип работы которых заключается в том, что тепло радиатора, переходит от ребёр радиатора к частицам воздуха, которые в свою очередь сдуваются подключенным вентилятором охлаждения.



Рисунок 2. Система теплоотведения AMD Wraith Prism

Существуют ещё так называемые водяные системы охлаждения. Принцип действия таких систем основан на следующем. Вода, или любая другая охлаждающая жидкость постоянно циркулирует по замкнутому контуру, поступая к компонентам компьютера, нуждающимся в охлаждении. Затем, вода по шлангам проходит дальше и уже сама охлаждается в радиаторе, где тепло от воды передается через радиатор в окружающую среду. Нагретый воздух отводится за пределы системного блока компьютера вентилятором малой мощности. Движение воды в системе водяного охлаждения осуществляется посредством специальной помпы. Поскольку вода имеет большую теплопроводность, чем воздух, она гораздо эффективнее отводит тепло от процессора.

Система водяного охлаждения обладает рядом преимуществ по сравнению с воздушным охлаждением, т.к. эффективность такого охлаждения гораздо выше воздушного, а значит возможно увеличение производительности процессора, путем увеличения рабочей частоты при той же температуре. Так же, отсутствие в системе охлаждения вентиляторов высокой мощности снижает уровень

посторонних шумов при работе, что делает работу пользователя более комфортной.

К недостатком системы водяного охлаждения можно отнести большую стоимость по сравнению с системами воздушного охлаждения, а так же требования к квалификации персонала, устанавливающим такую систему, т.к. некачественный монтаж может привести к выходу из строя дорогостоящего оборудования.

Видеокарты для персональных компьютеров так же обладают высокой удельной мощностью [85] и поставляются пользователю с установленной на графический процессор системой охлаждения, в состав которой входят радиатор и термоинтерфейс. Пример такой системы охлаждения приведен на рисунке 3.

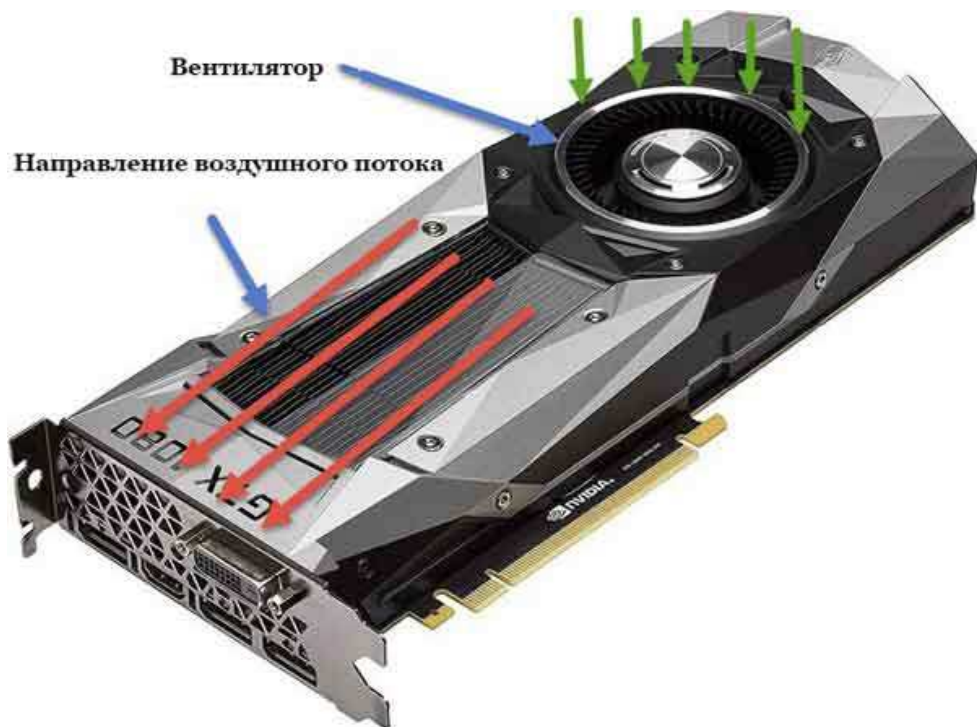


Рисунок 3. Пример системы охлаждения видеокарты

Существующие электро- радиоэлементы, предназначенные для создания силовых модулей преобразовательной техники выпускаются в типовых корпусах, в документации на которые даны рекомендации по выбору системы теплоотвода [3, 4, 7, 22, 26, 37, 72].

При применении радиатора в каждом случае для качественного теплоотвода необходимо использование термоинтерфейса.

1.1. Обзор термоинтерфейсов

На сегодняшний день, существует множество термоинтерфейсов различного назначения. Для обеспечения качественного теплоотвода стоит учитывать теплопроводность термоинтерфейса, однако при серийном производстве, необходимо учитывать простоту монтажа, высокую повторяемость и требования к воздействиям факторов внешней среды и условий хранения. Ниже приведен краткий обзор существующих высокотехнологичных термоинтерфейсов.

1.1.1 Теплопроводящие прокладки

Эластичные прокладки, изготавливаются из керамико-полимерных теплопроводящих диэлектрических материалов и представляют собой тонкопленочные силиконовые эластомеры. Данный тип может применяться в изделиях техники, работающей в температурном диапазоне от минус 60°C до плюс 250°C [62]. Пример готовых прокладок приведён на рисунке 4.

Преимущество данного типа термоинтерфейса заключается в том, что монтаж электронных тепловыделяющих компонентов осуществляется без нанесения каких либо теплопроводящих паст, что снижает время сборки, а так же позволяет обеспечить электрическую изоляцию между корпусом прибора и радиатором без дополнительных элементов конструкции, таких, как например текстолитовая площадка.



Рисунок 4 Образцы теплопроводящих прокладок

Это позволяет исключить влияние теплового сопротивления дополнительных изолирующих элементов, применяемых при использовании пастообразных термоинтерфейсов, на общее тепловое сопротивление «кристалл-среда». Так же этот способ обеспечивает качественный теплоотвод без дополнительных операций и материалов, связанных с обеспечением адгезии поверхностей радиатора и корпуса прибора.

В России, материалы, из которых возможно изготавливать данный тип термоинтерфейса выпускает компания Номакон. Для дополнительной устойчивости к возможным повреждениям при чрезмерном усилии затяжки на этапе монтажа, некоторые марки термоинтерфейсов помимо теплопроводящего компаунда сочетают в себе стекловолокно, выполняющее функцию армирования. Усиление структуры материала позволяет усилить сжатие сопрягаемых поверхностей тепловыделяющего элемента и радиатора охлаждения в пределах до 40 МПа без нарушения целостности материала [69]. При усилении сжатия теплопроводной прокладки она становится тоньше и при этом материал прокладки в большей степени проникает в полости поверхностей и так называемые микротрещины. Таким образом, усиление сжатия позволяет снизить тепловое сопротивление «радиатор-корпус».

Материалы компании Номакон серии КПТД не токсичны, т.е. не являются газвыделяющими материалами, не являются химически активными с веществами, используемыми при монтаже и обработке печатных плат, а так же обладают электроизоляционными свойствами.

Для удобства пользователя прокладка покрыта тонким слоем липкого клеящего материала. Липкий слой нужен для удобства позиционирования, и не заменяет полноценное крепление корпуса прибора к радиатору. Состав клеевого слоя подобран таким образом, чтобы позволять пользователю совершить повторный монтаж при неудачном позиционировании прокладки.

Высокая теплопроводность в сочетании с тонким слоем данного термоинтерфейса при достаточном усилии сжатия позволяют достичь минимального теплового сопротивления «корпус–радиатор».

Форма прокладок из материала КПТД может быть разной, от простых прямоугольников, до сложных форм, в том числе под конкретные нужды потребителя, что при серийном производстве позволяет сократить время изготовления приборов.

Сравнительные свойства материалов КПТД-2/1 и КПТД-2/2 приведены в таблице 1.

Таблица 1. Сравнительные свойства КПТД-2/1 и КПТД-2/2

Наименование	Норма по ТУ РБ 100009933.004	
	Марка материала	
	КПДТ-2/1	КПДТ-2/2
Внешний вид	Эластичный резиноподобный однородный листовой материал	
Плотность, г/см ³	2,05-2,20	1,90-2,10
Толщина, мм	от 0,15 до 2,0	
Рекомендуемое усилие сжатия, МПа, не менее	3,5	
Максимальное усилие сжатия, МПа, не более	20	
Предельная степень растяжения (упругость), %, не менее	50	
Электрическая прочность, кВ/мм, не менее	18-25	15- 20
Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом•см, не менее	10 ¹⁴	10 ¹³
Теплопроводность, Вт/(м·К), не менее	0,80	1,1
Удельное тепловое сопротивление, (К·см ²)/Вт, при толщине листа 0,20±0,02 мм и давлении сжатия 0,69 МПа (100 psi), (для корпусов ТОЗ, ТО220), не более	3,10	2,7

Изготовитель данного материала так же приводит зависимость термического сопротивления от силы сжатия (рисунок 5). Из рисунка 5 видно, что степень сжатия так же положительно сказывается на тепловом сопротивлении материала.

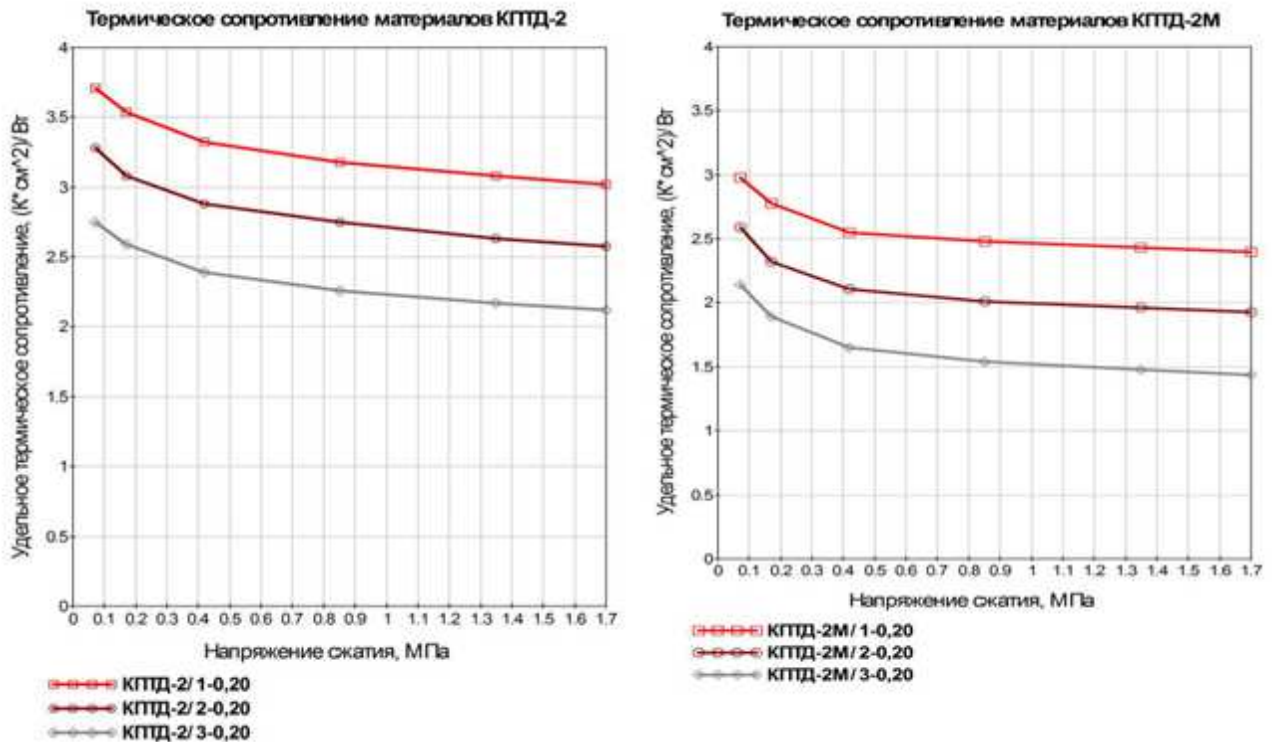


Рисунок 5. Зависимости теплового сопротивления материала от усилия сжатия

При винтовом креплении, для электрической изоляции радиатора от корпуса прибора винты используются вместе с изолирующими втулками. Пример применения прокладок приведён на рисунке 6.



Рисунок 6. Пример использования теплопроводящих прокладок для монтажа ЭРИ

Однако для правильного использования данного материала качество прилегающих поверхностей радиатора и тепловыделяющего элемента должны быть дополнительно обработаны [18]. Среднеарифметическое отклонение профиля поверхности должно быть не менее $R_A=0,64$ мкм по ГОСТ 2789.

Плоскостности поверхностей и их параллельность должны соответствовать 7 степени точности или выше [17], т.к. наличие дефектов сопрягаемых поверхностей может вызвать нарушение целостности прокладки, что негативно отражается на электрической прочности изоляции. Для исключения возможности снижения теплового сопротивления из-за полостей поверхности, после нанесения прокладки её рекомендуется прокатать резиновым валиком.

При применении прокладок больших размеров с площадью поверхности от 15 до 1300 см² существует проблема качества обработки такой поверхности. Даже максимальная толщина и эластичность прокладки зачастую при сжатии не может компенсировать неровности поверхностей, а также их непараллельность.

1.1.2 Теплопроводящие пасты

Одним из самых распространённых термоинтерфейсов является теплопроводящая паста или, так называемая, термопаста.

Принцип её действия крайне прост – нанося пасту на поверхность прижимных поверхностей радиатора и прибора, паста, из-за своей текучести проникает в микротрещины и более крупные дефекты поверхностей, вытесняя собой воздух и уменьшая этим тепловое сопротивление схемы «радиатор-корпус»

Термопаста – это композитный состав, имеющий полужидкую структуру и состоящий из вязкого компаунда и теплопроводящего наполнителя. За счёт введения теплопроводящего наполнителя, полученное соединение обладает высокой теплопроводимостью, а вязкость компаунда позволяет заполнять собой микрополости сопрягаемых поверхностей, не вытекая при этом с течением времени.

Данный тип термоинтерфейса применяется повсеместно в преобразовательной технике, силовой электронике, бытовой электронике, персональных компьютерах, а так же технике специального назначения [96, 98].

Из-за стремления изготовителей электронной продукции к снижению габаритных параметров изделий, а так же к увеличению производительности

выпускаемых приборов производители уделяют большое внимание к обеспечению отвода тепла от греющегося элемента во внешнюю среду через радиатор, роль которого часто играет корпус прибора. Высокая теплопроводность, низкий коэффициент теплового расширения и нужная степень вязкости термоинтерфейса позволяют увеличить ресурс изделия и предотвратить преждевременный отказ из-за перегрева [16].

В таблице 2 приведены основные и инновационные материалы и их свойства в качестве теплопроводящего компонента термопасты.

Таблица 2. Основные теплопроводящие материалы и их свойства

Материал	Теплопроводность, Вт/м·К	Коэффициент температурного расширения, $10^{-6}/\text{К}$	Плотность, г/см ³
Алмаз	2000	0,9	3,51
Алюминий	247	23	2,7
Вольфрам	155	4,5	19,3
Галлий	28,1	18	5,91
Графит	2435	7,9	2,23
Графен	5000	4,8	-
Золото	315	14	19,32
Инвар	10	1,6	8,05
Индий	81,8	32,1	7,31
Карбид кремния	270	3,7	3,3
Ковар	17	5,1	8,36
Медь	398	17	8,9
Молибден	142	4,9	10,22
Нитрид алюминия	320	4,5	3,3
Нитрид бора	180	4,3	2,18
Оксид бериллия	260	6	3
Оксид магния	156	14,6	3,58

Продолжение таблицы 2

Материал	Теплопроводность, Вт/м·К	Коэффициент температурного расширения, $10^{-6}/\text{К}$	Плотность, г/см ³
Оксид цинка	54	4	5,61
Свинец	30	39	11
Серебро	429	10,9	10,5
Углеродные нанотубки	3000	-0,25	-

Из-за особенностей строения кристаллической решетки большинство металлов обладают высокой теплопроводностью. К недостаткам металлов, как теплопроводящих наполнителей, можно отнести высокий коэффициент температурного расширения (КТР) и электрическую проводимость, что лишает термопасту, при использовании металлического наполнителя, электроизолирующих свойств.

Углеродные соединения имеют пониженную электрическую проводимость, что позволяет использовать их при непосредственном контакте радиатора и тепловыделяющего элемента. Благодаря своим высоким теплопроводящим характеристикам они нашли широкое применение в качестве наполнителя теплопроводной пасты, но высокая стоимость затрудняет использование термопаст с таким наполнителем рядовому потребителю.

Нитрид алюминия, относящийся так же к керамическим материалам, имеет относительно низкую плотность, обладая в то же время хорошими теплопроводящими свойствами. В сочетании с перечисленными достоинствами низкий КТР делает данный материал предпочтительным для использования его в качестве теплопроводящей составляющей термопасты. Однако негативное влияние оксинитридов, образованных вокруг частиц порошка при взаимодействии с кислородом, содержащимся в воздухе приводит к значительному снижению теплопроводности термопасты [1, 11].

В качестве теплопроводящей составляющей термопасты можно использовать оксид бериллия, обладающего рядом параметров, позволяющих достичь высоких параметров теплопередачи в применении с вязким компонентом, но из-за опасности его паров изготовителями он не применяется.

Оксид магния обладает высокими параметрами теплопроводности и при этом – низкой плотностью, что может использоваться для достижения низкого уровня вязкости готовой термопасты. Однако высокий КТР данного материала делает его применимым в термопастах с очень низким диапазоном рабочих температур.

Нитрид бора и карбид кремния также имеют высокую теплопроводность, и КТР, а так же обладают диэлектрическими свойствами, что даёт возможность применять их в теплопроводящих пастах как широкого, так и узкого профиля применения.

Ниже приведён обзор выпускаемых термопаст [23, 44, 48]. Химический состав, основные параметры и максимальная температура системы охлаждения при тестовых испытаниях приведены в таблице 3.

Таблица 3. Результат тестирования выпускаемых термопаст.

Название	Теплопроводность, Вт/м·К	Температура системы при испытаниях, °С	Наполнитель
Coollaboratory Liquid Pro	82	81	Ga, In
Coollaboratory Liquid Ultra	40	84	Ga, In
ЖМ-6	34	81	Ga, In
Indigo Xtreme	20	83	Ga, In
Nanoxia HeatBuster	10,4	85	Al, ZnO
OCZ Ultra 5+	3,8	84	ZnO, Ag, BN, Al ₂ O ₃
Thermalright Chill Factor III	3,5	85	ZnO
КПТ-8	0,8	89	ZnO
Prolimatech PK1	10	84	Al, ZnO
АлСил-3	1,8	89	ZnO, Al

Продолжение таблицы 3

Название	Теплопроводность, Вт/м·К	Температура системы при испытаниях, °С	Наполнитель
IC Diamond 24 Carat	4,5	83	С
Arctic Cooling MX-3	8,2	83	С
Arctic Silver 5	8,7	86	Ag
Nexus	7,8	85	Ag
Zalman ZMSTG2	4,1	86	-
Noctua	3,5	84	-
Cooler Master ThermalFusion 400	2,89	87	-
Shin-Etsu x237783D	6,0	84	-
Coolage CACT3 Nano	5	84	-
Gelid Solutions GC-Extreme	8,5	84	-
Thermaltake TG-1	3	83	-
Tuniq TX	4,6	83	-

Наибольшую популярность в России получила термопаста КПТ-8 Кремнийорганическая Паста Теплопроводная (рисунок 7).



Рисунок 7. Паста КПТ-8, поставляемая в тубике

Паста КПТ-8 представляет собой белую массу, которая обладает высокой степенью вязкости. В качестве теплопроводящей составляющей использует порошок оксида цинка. Не смотря на низкие показатели теплопроводности по

сравнению с другими пастами, приведёнными в таблице 3, достоинством этой термопасты является то, что она полностью пожаробезопасна, химически инертна и не является токсичной для человека. Данная паста применима при температуре от -60 до $+180$ °С [73].

1.1.3 Клеевые материалы

Данный тип термоинтерфейса по своей структуре схож с теплопроводящими пастами с тем отличием, что после нанесения полностью застывает.

Для получения клея с диэлектрическими теплопроводными свойствами в его состав вводят оксиды, нитриды и карбиды металлов. Наибольшей теплопроводностью обладают клеевые материалы. В качестве теплопроводящей составляющей у них применяется нитрид алюминия и нитрид бора, обладающих высокой теплопроводности: у нитрида бора – 120 Вт/м·К, у нитрида алюминия – 160 Вт/м·К. В случае введения в клеевой состав одного из этих наполнителей до максимально возможной технологической вязкости, композит получается с теплопроводностью не более $2,5$ Вт/м·К. Данные по основным параметрам отечественных теплопроводящих клеев приведены в таблице 4.

При большем наполнении начинает сказываться «объемный эффект», вызывающий повышение контактных термических сопротивлений на границе полимер-наполнитель, что замедляет рост теплопроводности. Таким образом, следует учесть, что теплопроводность клеевого состава характеризуется не только свойствами теплопроводящего компаунда, но и собственными свойствами структурного полимера.

Таблица 4. Основным параметры отечественных теплопроводящих клеев

Параметры	Марки клеев				
	ВК-9	ВКП-8	ВК-36	ЦМК-ТП	Эласилы 137-182, 137-242
Основа состава	эпоксидная смола	эпоксидно-каучуковая смола	эпоксидная смола	эпоксидная смола	эпоксидно-каучуковая смола
Теплопроводность, Вт/м·К	0,65-0,87	2,5	1,0-1,5	1,8-2,5	2
Наполнитель	AlN или BN	BN	AlN	BN	AlN, Al ₂ O ₃
Удельное объемное сопротивление, Ом·см	$1 \cdot 10^{13}$	–	–	–	$1 \cdot 10^{14}$
Электрическая прочность, кВ/мм, не менее	20	–	–	–	20
Прочностные адгезионные свойства, МПа	6-8	10	36	5	1,5-2
Рабочая температура, °С	от минус 60 до +125 °С	от минус 60 до +80 °С	от минус 60 до +150 °С	от минус 60 до +250 °С	от минус 60 до +200 °С
Вязкость	от легко-наносимого состава до густо-наполненной массы	густая пастообразная масса	пленка толщиной от 1 до 3 мм, текучая при отверждении	в состоянии замазки	пастообразная масса

Непосредственно в зоне клеевого соединения теплообмен между клеевым составом и склеиваемыми материалами зависит от термического сопротивления, которое складывается в основном из следующих факторов:

- температура и давление, при которых застывает клеевой состав;
- вязкость клеевого состава и его способность к смачиванию склеиваемых поверхностей;
- внутренние напряжения, возникающие в процессе образования адгезионных связей на границах полимер-наполнитель, полимер-склеиваемая поверхность.

Клей ВК-9 и клеи-герметики Эласил 137-182 и Эласил 137-242 [50, 38] широко применяются при монтаже радиоэлектронной аппаратуры. Клеи ВКП-8, ВК-36, ЦМК-ТП – общетехнического применения, разработанные для авиационной и ракетно-космической промышленности.

Зарубежные клеевые теплопроводящие материалы представляют собой соединения на основе низкомолекулярных кремнийорганических олигомеров с различными добавками и наполнителями для получения теплопроводных свойств. Основные параметры зарубежных клеевых теплопроводящих материалов приведены в таблице 5.

Таблица 5. Основные параметры зарубежных теплопроводящих клеев

Продукт	Особенности	Электрическое сопротивление, Ом·см	Теплопроводность Вт/м·с	Прочностные адгезионные свойства, МПа
ME 7155	Хорошо растворим	$> 1 \cdot 10^{14}$	$> 1,7$	1,8
ME 7156	–	$> 1 \cdot 10^{14}$	$> 1,7$	2,4

Продолжение таблицы 5

Продукт	Особенности	Электрическое сопротивление, Ом·см	Теплопроводность Вт/м·с	Прочностные адгезионные свойства, МПа
ME 7159	С алмазным наполнением	$> 1 \cdot 10^{14}$	$> 11,4$	1,8
ME 7658-RC	–	$> 1 \cdot 10^{14}$	$> 3,0$	1,5

Во всех случаях использования теплоотвода корпус прибора крепится к радиатору через слой термоинтерфейса, который обладает теплопроводящими свойствами на порядок выше, чем воздух и, вытесняя его из микротрещин двух соединённых поверхностей, увеличивает теплопроводность от полупроводникового прибора к радиатору.

Вклад теплового сопротивления термоинтерфейса в общее тепловое сопротивление тепловой схемы прибора R_{thcs} составляет от 20% до 65%, поэтому термоинтерфейс должен полностью заполнить воздушный промежуток между корпусом тепловыделяющего элемента и радиатором охлаждения, а толщина слоя термоинтерфейса должна иметь оптимальное значение, т.к. очень тонкий слой может не обеспечить качественной теплопередачи за счет неполного заполнения воздушных полостей (рисунок 8) [83, 84].

Объем приборов стараются минимизировать, радиаторы для охлаждения транзисторов берут такого размера, что бы температура транзистора при номинальной нагрузке не превышала нормальные условия эксплуатации, указанные в технических условиях, т.е. порядка 70-100 градусов

Наличие воздушных полостей в промежутке между корпусом тепловыделяющего элемента и радиатором охлаждения или плохие теплофизические параметры термоинтерфейса при длительном использовании прибора может привести к перегреву прибора и в конечном итоге сокращению срока службы изделия или выходу из строя.

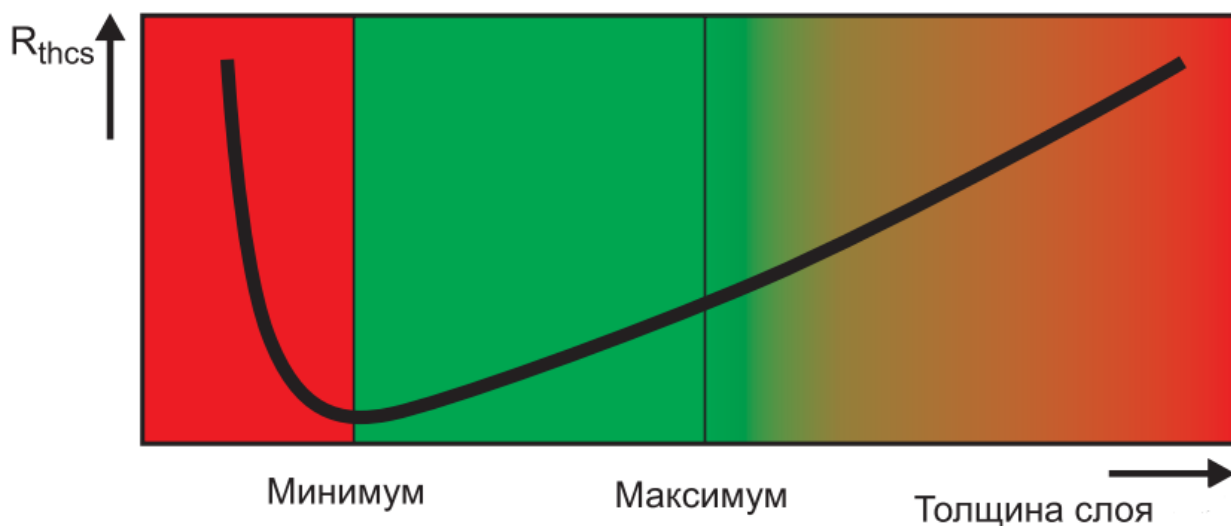


Рисунок 8. Зависимость теплового сопротивления корпус-радиатор от толщины слоя термоинтерфейса

В технических данных на выпускаемый полупроводниковый прибор, имеющий возможность крепления к радиатору, производитель зачастую указывает рекомендации по выбору радиатора и нанесению теплопроводящего компаунда. Например, в случае с полевыми транзисторами это очень важно, т.к. сопротивление проводящего канала в открытом состоянии будет напрямую зависеть от температуры кристалла, а сопротивление открытого состояния в свою очередь влияет на КПД преобразователей напряжений. Так же, известна проблема преждевременной деградации кристалла светодиодов при перегреве. При использовании мощных светодиодов с качественным теплоотводом можно избежать преждевременного выхода из строя осветительного прибора.

Некоторые компании поставляют свои приборы потребителям с уже нанесённым термоинтерфейсом [21, 29, 74], что увеличивает стоимость прибора по сравнению с аналогами. Однако, данная мера не исключает возможности нарушения нанесённого слоя термоинтерфейса при транспортировке или монтаже прибора на радиатор без дополнительного визуального осмотра перед установкой.

1.2. Методы обеспечения требуемых теплофизических параметров термоинтерфейса при установке тепловыделяющего элемента на радиатор охлаждения

1.2.1 Определение минимального количества термоинтерфейса путем его взвешивания на прецизионных весах.

Данный метод заключается в следующем. Эмпирическим методом, либо по предварительному расчёту определяется необходимое и достаточное для полного заполнения промежутка между корпусом тепловыделяющего элемента и радиатором охлаждения количество термоинтерфейса, для заранее известных типов тепловыделяющего элемента и его теплоотводящего радиатора.

Масса тепловыделяющего элемента определяется предварительно взвешиванием с высокой точностью. После этого производится нанесение термоинтерфейса и проводится повторное взвешивание. Разница масс элемента до нанесения термоинтерфейса и после является массой термоинтерфейса, нанесённого на элемент. Пример измерения представлен на рисунке 9.

Даже при малой массе термоинтерфейса этот метод обладает высокой повторяемостью, т.к. современные весы, позволяют измерять с точностью до 1 мг и имеют погрешность до 0,01%, что практически исключает погрешность измерений [82, 10].



Рисунок 9. Пример измерения массы нанесённого термоинтерфейса

Однако использование этого метода не гарантирует хорошую работу термоинтерфейса, т.к. она зависит не только от количества теплопроводящего компаунда, но и от его распределения между радиатором и корпусом прибора. При неравномерном распределении термоинтерфейса возможен локальный перегрев элемента. При некачественно обработанных поверхностях радиатора или элемента так же возможно неравномерное распределение термоинтерфейса, либо его количество может оказаться недостаточным. Отсюда следует, что установка радиатора, даже сразу после взвешивания, не даёт абсолютной гарантии оптимального нанесения термоинтерфейса.

Недостатком данного метода так же является невозможность проверки теплофизических параметров термоинтерфейса без снятия радиатора.

1.2.2 Нанесение термоинтерфейса через трафарет

Используя данный метод, количество наносимого термоинтерфейса определяется через отношение толщины слоя трафарета и суммарной площади отверстий в нём, через которые наносится термоинтерфейс на теплосток элемента [89, 66]. Пример трафарета и результат нанесения термоинтерфейса приведены на рисунке 10.

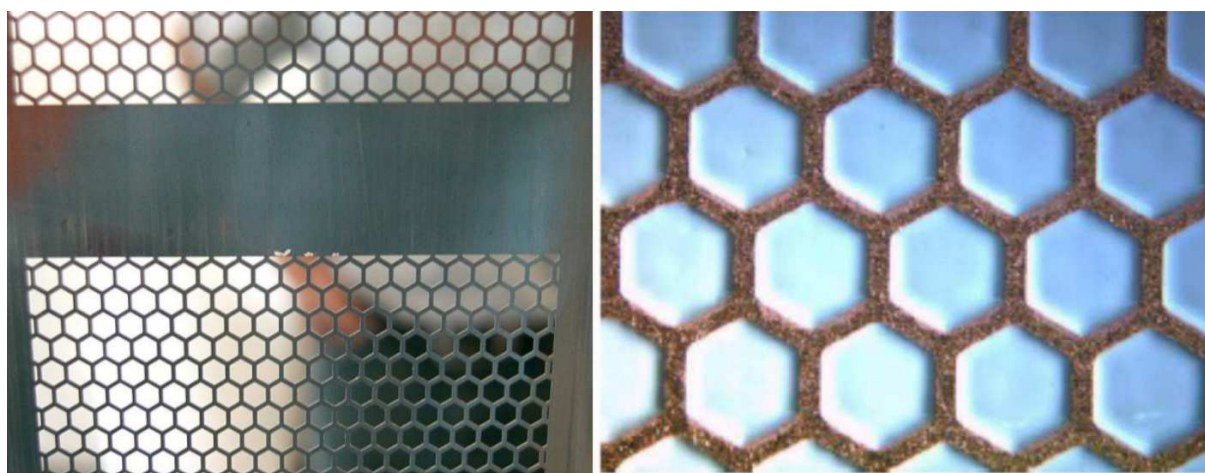


Рисунок 10. Трафарет для нанесения термоинтерфейса и результат нанесения термоинтерфейса.

Данный метод имеет низкую погрешность и обеспечивает высокую повторяемость, т.к. параметры трафарета не зависят от внешних факторов, что позволяет автоматизировать процесс нанесения термоинтерфейса подобным образом. Установка для автоматического нанесения термоинтерфейса представлена на рисунке 11.

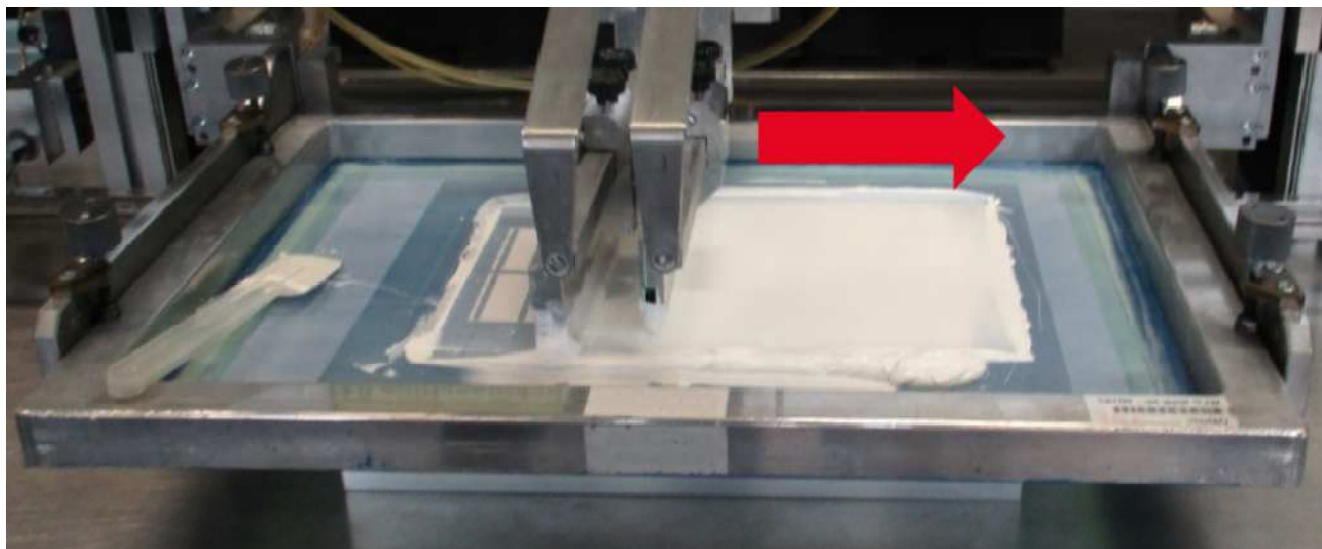


Рисунок 11. Установка для автоматического нанесения термоинтерфейса через трафарет

Установка для автоматического нанесения термоинтерфейса, приведённая на рисунке 11 работает следующим образом. На трафарет наносится обильное количество термоинтерфейса, после чего шпатель из эластичного материала, например из мягких сортов резины или силикона проходит вдоль всей поверхности трафарета несколько раз, заполняя все его полости термоинтерфейсом.

Данный способ нанесения применим не только для нанесения на всю поверхность прибора, но и в том случае, когда необходимо нанести термоинтерфейс не на всю поверхность прибора, а только на малую часть, например для установки локального теплоотвода греющихся частей.

Количество нанесённого термоинтерфейса на поверхность прибора, при условии, что он наносится равномерно на всю площадь поверхности, зависит от

толщины трафарета, площади отверстий и расстояния между отверстиями по формуле (1).

$$V_{TIS} = S_{отв.} \cdot h_{траф.} \quad (1)$$

где V_{TIS} – объём термоинтерфейса;

$S_{отв.}$ – суммарная площадь всех отверстий в трафарете;

$h_{траф.}$ – толщина трафарета.

Таким образом, для достижения нужного объёма нанесенного термоинтерфейса, можно варьировать толщину трафарета, а так же размер и количество отверстий в нём (рисунок 12).

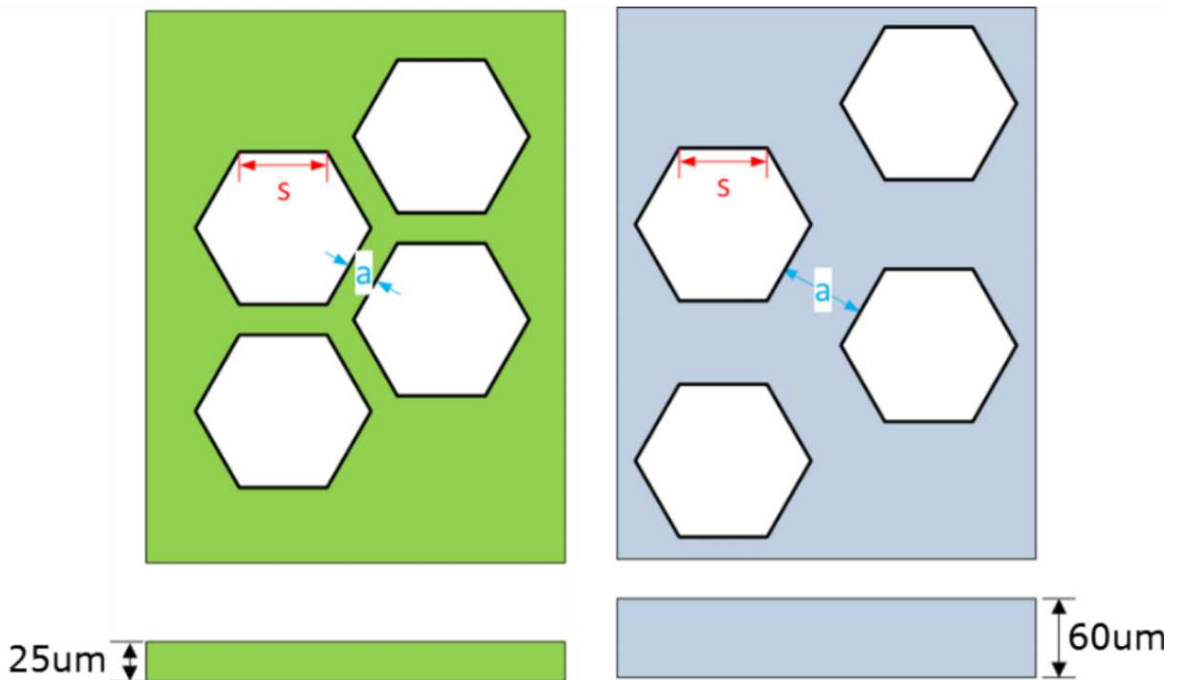


Рисунок 12. Пример изменения толщины трафарета и количества отверстий в нём, для достижения нужного объема термоинтерфейса

Данный метод обладает высокой повторяемостью нанесения термоинтерфейса, однако не позволяет контролировать качество нанесенного термоинтерфейса при ухудшении свойств термоинтерфейса. Так же этот метод не дает возможности определить некачественный монтаж радиатора без снятия.

1.3. Методы контроля качества термоинтерфейса

1.3.1 Использование механических толщиномеров

Для определения толщины термоинтерфейса широко используются простые механические толщиномеры гребенчатого (рисунок 13) или дискового типа (рисунок 14) [29].

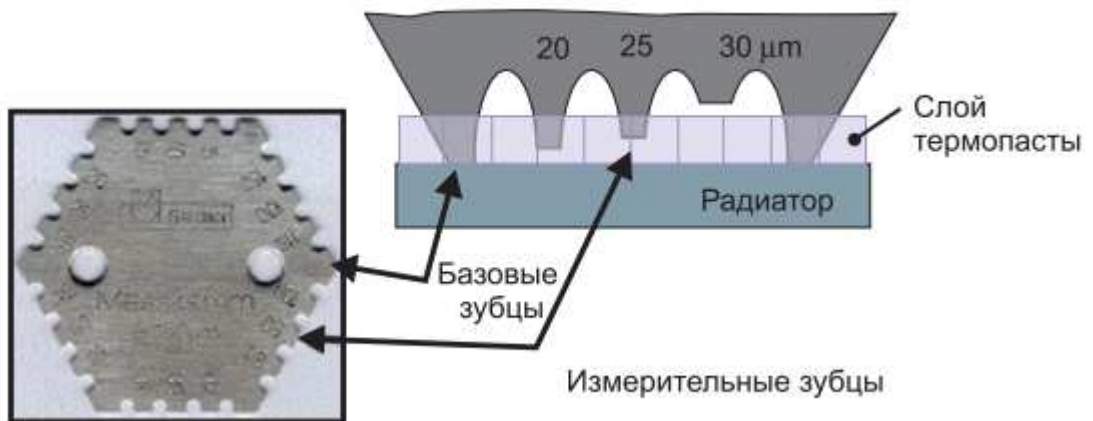


Рисунок 13. Механический толщиномер гребенчатого типа



Рисунок 14. Механический толщиномер дискового типа

Принцип действия механического толщиномера заключается в том, что толщиномер устанавливается на проверяемую поверхность с нанесённым слоем термоинтерфейса базовыми зубцами, и перемещается параллельно исследуемой

поверхности, опираясь на базовые зубцы. Т.к. измерительные зубцы находятся на известном расстоянии от базовых зубцов, оставленный ими след на слое термоинтерфейса будет говорить о том, что толщина термоинтерфейса превышает его. Зубец, не оставляющий следа на термоинтерфейсе будет характеризовать толщину термоинтерфейса. Толщиномер, представленный на рисунке 13, позволяет измерять толщину термоинтерфейса в диапазоне 5–100 мкм.

При использовании данного метода, измерение толщины термоинтерфейса должно проводиться персоналом, прошедшим предварительную подготовку, и имеющего соответствующую квалификацию. Поверхность радиатора при этом должен быть предварительно обработан, т. к. неправильное передвижение толщиномера вместе с неровностями поверхности могут вызвать ложный результат. Наличие посторонних примесей в термоинтерфейсе так же могут привести к погрешности измерений.

Использование дискового толщиномера позволяет проводить измерения с большей точностью, по сравнению с гребенчатым толщиномером. Так же, этот тип толщиномеров меньше повреждает слой нанесённого термоинтерфейса. Принцип работы устройства заключается в следующем. Измерительный диск толщиномера с нанесёнными насечками разной глубины прокатываются по слою термоинтерфейса, при этом толщиномер упирается двумя опорными дисками, расположенные по бокам, в поверхность радиатора. Термоинтерфейс, попадая на измерительный диск забивается в нанесённые насечки. Толщина термоинтерфейса определяется по шкале, нанесенной на опорных дисках, в том месте, где прерывается след оставшегося в насечках термоинтерфейса (рисунок 15).

К недостатку данного способа можно отнести повреждение слоя в зоне контроля, и обязательный визуальный контроль после каждого измерения, что увеличивает время проверки и вносит влияние человеческого фактора на точность измерений [28]. Так же данный метод применим только к контролю качества нанесения термопаст, но не твёрдых видов термоинтерфейса.



Рисунок 15. Пример использования дискового гребенчатого толщиномера

1.3.2 Контроль температурозависимого параметра

Многие выпускаемые приборы имеют так называемый температурозависимый параметр – параметр, или характеристика, которое имеет заранее известное отклонение, зависящее от температуры [2, 4, 41]. Так, например, у мощных светодиодов от температуры зависит длина волны, соответствующая максимуму излучения [76, 88]. Типовая характеристика зависимости длины волны от температуры для светодиода при разных токах приведена на рисунке 16.

Для мощных полевых транзисторов, в зависимости от схемы включения и параметров сигнала управления, в качестве температурозависимого параметра могут выступать как падение напряжения сток-исток [51, 37], так и сопротивление открытого состояния [97]. Типовая характеристика зависимости сопротивления открытого канала полевого транзистора от температуры показана на рисунке 17.

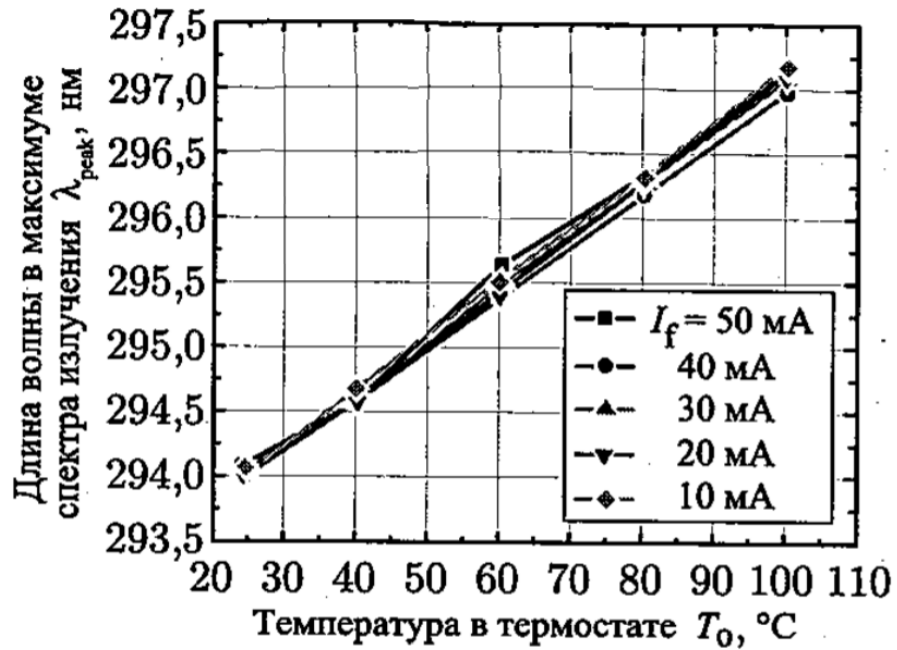


Рисунок 16. Зависимость длины волны от температуры светодиода

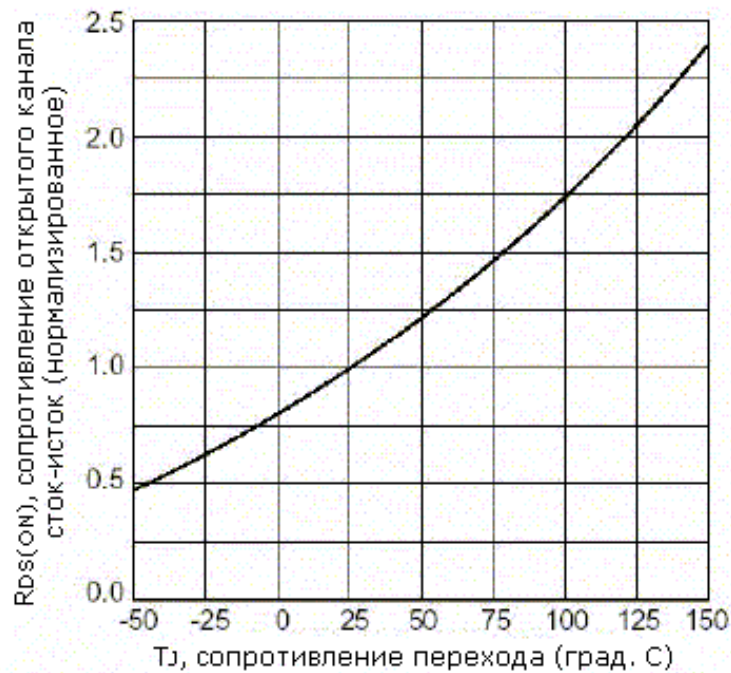


Рисунок 17. Зависимость сопротивления открытого состояния канала полевого транзистора от температуры

Для IGBT транзисторов температурозависимым параметром является напряжение между коллектором и эмиттером [95]. Зависимость напряжения между коллектором и эмиттером от температуры приведена на рисунке 18.

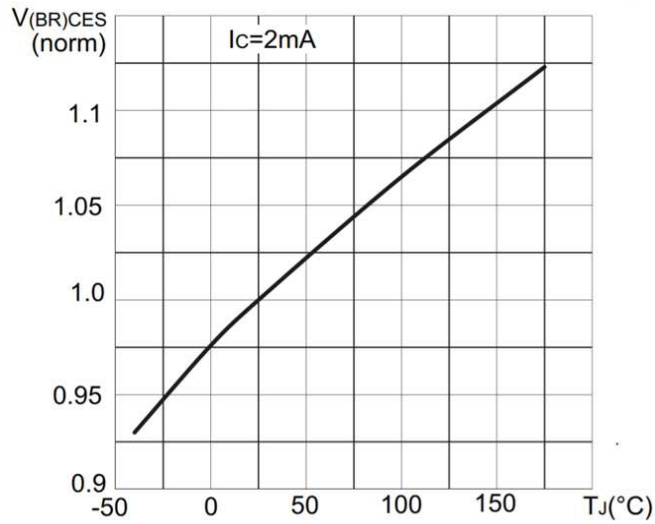


Рисунок 18. Зависимость напряжения коллектор–эмиттер открытого состояния IGBT транзистора от температуры

1.3.3 Контроль теплового сопротивления с помощью передаточной схемы

Общее тепловое сопротивление «кристалл–корпус» или «кристалл–окружающая среда» R_{Tjx} полупроводниковых приборов определяется выражением [5, 15]:

$$R_{Tjx} = \frac{T_j - T_x}{P_{pn}} \quad (2)$$

где T_j – температура кристалла полупроводникового прибора;

T_x – температура корпуса или окружающей среды;

P_{pn} – мощность тепловыделения прибора.

Полупроводниковый прибор может иметь любую конструкцию и обладать разным количеством элементов конструкции, каждый из которых обладает собственными параметрами теплопроводности и теплоемкости, вносящих свое влияние в общее тепловое сопротивление.

В качестве примера, на рисунке 19, показана типовая конструкция светоизлучающего диода и его термическая модель, позволяющая наглядно показать процесс распространения тепла от кристалла светодиода в окружающую среду [7].

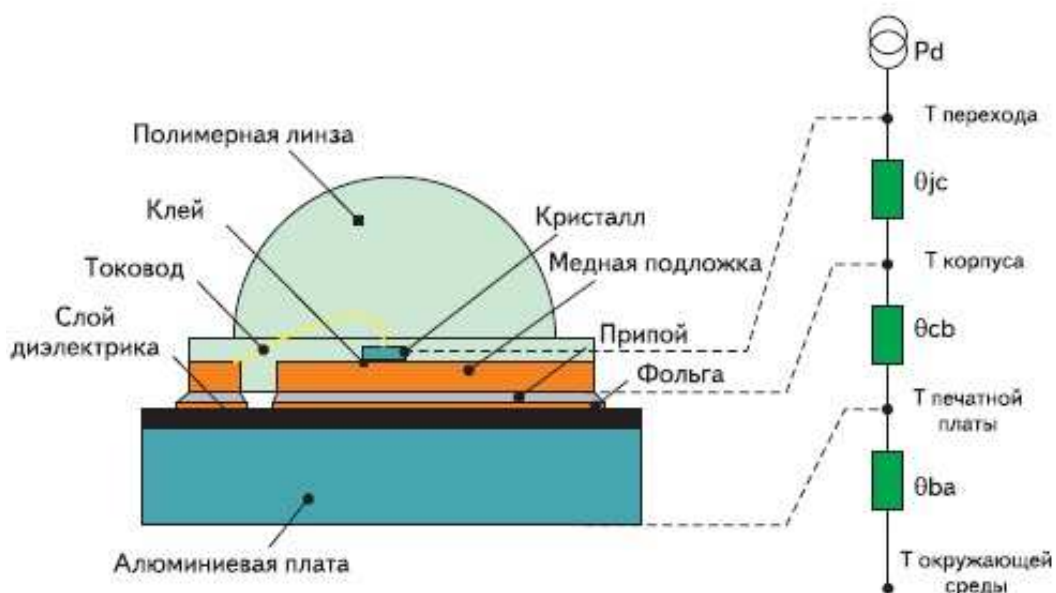


Рисунок 19. Конструкция светодиода и его термическая модель

Для контроля всех компонентов тепловой схемы с целью минимизации полного теплового сопротивления от кристалла светодиода в окружающую среду, необходимо знать значения тепловых сопротивлений каждого компонента.

Для определения теплового сопротивления каждого компонента светодиода, вносящего свой вклад в общее тепловое сопротивление конструкции при расчетах рассеиваемой мощности и качества теплоотведения, составляют тепловую модель конструкции светодиода. Основой построения данной модели является схожесть распространения тепла от горячего элемента конструкции к холодному с распространением тока в электрической цепи от большего электрического потенциала к меньшему. Данный принцип построения называется принципом теплоэлектрической аналогии. Согласно данному принципу теплоемкость каждого элемента конструкции так же является аналогом электрической емкости в электронных цепях.

Таким образом, тепловую схему конструкции светодиода можно представить в виде многозвенной RC-цепи. Через все элементы конструкции от самого горячего элемента (кристалл светодиода) начинает развиваться тепловой поток перенося излишнее тепло к самому холодному элементу конструкции. Самым холодным элементом конструкции принимается либо корпус прибора, либо окружающая среда. Тепловое сопротивление среды определяется через

коэффициент теплопередачи материала корпуса и площади соприкосновения с внешней средой. Тепловое значение постоянная времени есть прямой аналог постоянной времени для электрической схемы $\tau = R \cdot C$. Для того, что бы более точно построить тепловую модель используют как теплоэлектрический аналог на основе схемы Кауэра, так и аналог на основе схемы Фостера (рисунок 20).

Передаточные функции каждой из схем замещения отличаются друг от друга. При этом выражение передаточной функции каждой схемы зависит только от тепловых параметров конструкции прибора и их количества. Таким образом при имеющихся данных можно использовать и схему Кауэра и схему Фостера, а так же осуществлять преобразование одного типа схемы теплоэлектрического аналога в другой [86]. Пример определения тепловой передаточной функции в конструкции с несколькими элементами и заданной мощностью тепловыделения представлен в [64].

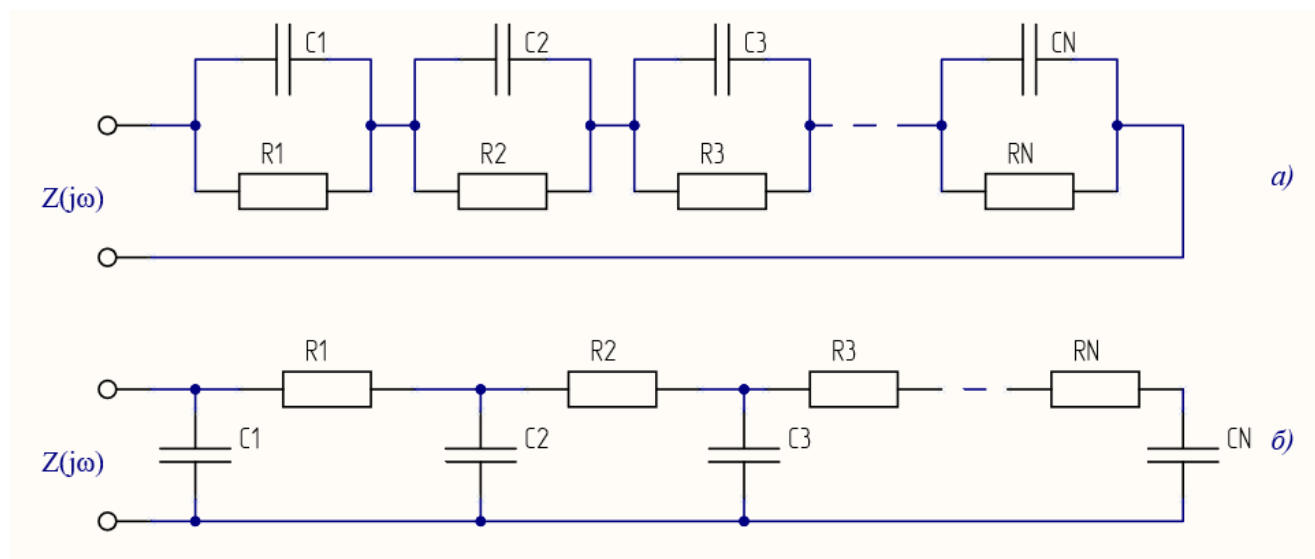


Рисунок 20. Теплоэлектрический аналог тепловой схемы полупроводникового прибора: а) по схеме Кауэра; б) по схеме Фостера

1.3.4 Стандартный метод контроля теплового сопротивления

Отличие данного метода от предыдущего заключается в том, что тепловое сопротивление конструкции прибора определяется через значения заранее известных тепловых сопротивлений и емкостей элементов, а так же через

измеренное значение выделяемой мощности кристалла полупроводникового прибора и его температуры. Мощность кристалла определяется пересчетом подводимой мощности, измеряемых выходных параметров, и заранее известный коэффициент полезного действия. Температура кристалла полупроводникового прибора определяется без использования датчиков температуры, методом измерения температурозависимой величины. Для определения передаточной характеристики тепла на полупроводниковый прибор воздействуют греющими импульсами тока [49]. При заданной длительности и амплитуде греющих импульсов данное тепловое воздействие можно сравнить с подаваемыми на электрическую многозвенную RC-цепочку импульсов напряжения. Время импульса должно быть достаточным для стабильной работы светодиода, но меньше тепловой постоянной «кристалл–корпус». Метод расчёта заключается в том, что на определённый объект подаётся несколько импульсов подводимой мощности, после чего происходит измерение температуры кристалла полупроводника $T_{SC}(t)$ в процессе нагрева исследуемого элемента до момента теплового равновесия. Исходя из полученных данных об изменении температуры кристалла полупроводника $T_{SC}(t)$ с течением времени, можно определить влияние тепловых сопротивлений элементов конструкции прибора [92]. Полученные данные представляют собой временную зависимость полной теплоемкости исследуемого прибора $C_{th\Sigma}$ от общего теплового сопротивления конструкции светодиода «кристалл–корпус» $R_{th\Sigma}$. Искомые величины определяются как:

$$C_{th\Sigma} = \frac{P_{heat} \cdot t}{T_{SC}(t) - T_{SC}(0)} \quad (3)$$

$$R_{th\Sigma} = \frac{T_{SC}(t) - T_{SC}(0)}{P_{heat}} \quad (4)$$

где P_{heat} – величина рассеиваемой мощности прибора;

$T_{SC}(t)$ – начальная температура кристалла прибора.

После анализа полученных данных можно судить о вкладе каждого элемента конструкции в общее тепловое сопротивление «кристалл - среда». Более

пологие участки функции $C_{th\Sigma}(R_{T\Sigma})$ (рисунок 21) показывают низкое влияние теплового сопротивления элементов конструкции объекта, обладающих высокой теплопроводностью и низким тепловым сопротивлением. Участки функции $C_{th\Sigma}(R_{T\Sigma})$ с резким изменением будут говорить о негативном влиянии элементов конструкции с высоким тепловым сопротивлением. Анализ данной функции позволяет определить, как сильно влияет на передачу тепла от кристалла светодиода в окружающую среду тепловое сопротивление каждого элемента конструкции [93].

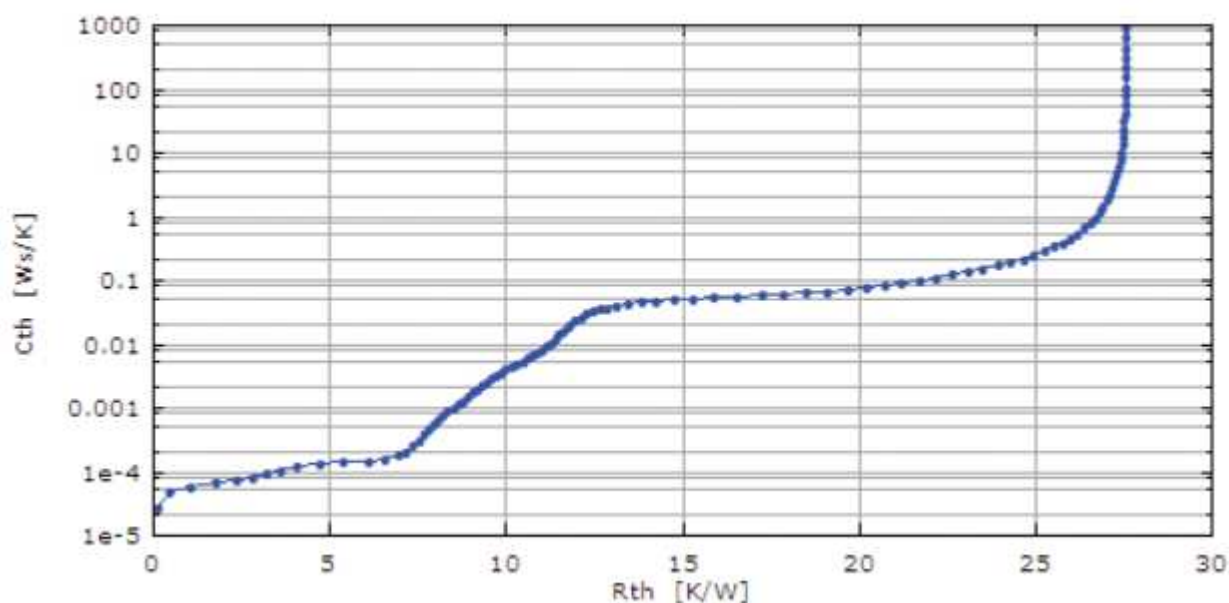


Рисунок 21. Вид функции $C_{th\Sigma}(R_{T\Sigma})$.

При использовании этого метода необходимо точное определение температуры кристалла с помощью температурозависимого параметра, которым обладает не каждое устройство. Так же, при определении передаточной функции необходимо поддерживать температуру корпуса объекта постоянной, что усложняет процесс измерения и схему измерительной установки в целом.

1.3.5 Модуляционный метод контроля теплового сопротивления

Модуляционный метод контроля позволяет определять тепловое сопротивление с более высокой точностью в сравнении с предыдущим методом. В данном методе на исследуемый объект подается последовательность импульсов

тока длительностью $t_{\text{имп}}$ [63]. Длительность импульса в каждый момент времени выражается по формуле:

$$t_{\text{имп}} = t_{\text{ср}}(1 + k \cdot \sin 2\pi ft) \quad (5)$$

где $t_{\text{ср}}$ – среднее значение длительности импульсов;

k – коэффициент модуляции;

f – частота подачи импульсов.

В этом случае средняя греющая мощность $P_{\text{гр}}(t)$ будет определяться выражением:

$$P_{\text{гр}}(t) = P_{\text{ср}} + P_{\text{перем}} \cdot k \cdot \sin 2\pi ft \quad (6)$$

где $P_{\text{ср}}$ – средняя подаваемая мощность;

$P_{\text{перем}}$ – размах амплитуды переменной составляющей подаваемой мощности.

Нелинейное изменение греющей мощности влияет на изменение температуры кристалла с некоторым смещением по времени. Данное смещение является аналогом сдвига фазы в электрической цепи и называется сдвигом фазы температуры. Сдвиг фазы температуры так же зависит от частоты воздействующих импульсов, теплового сопротивления и теплоемкости каждого элемента конструкции. Изменение температуры кристалла определяется с помощью температурозависимого параметра. Таким образом, используя известные значения переменной составляющей подводимой мощности $P_{\text{перем}}$, а так же температуры кристалла, можно определить сдвиг фазы и модуль передаточной функции тепла в исследуемом объекте. Сдвиг фазы передаточной функции φ определяется арктангенсом отношения реальной и мнимой составляющей преобразования Фурье:

$$\varphi = \arctg \frac{B(f)}{A(f)} \quad (7)$$

где $A(f)$ – мнимая составляющая;

где $B(f)$ – вещественная составляющая.

Функции $A(f)$ и $B(f)$ определяются через дискретное преобразование Фурье по выражениям:

$$A(f) = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N T_{SC}(t) \cdot \cos\left(2\pi \frac{i}{N}\right), \quad (8)$$

$$B(f) = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N T_{SC}(t) \cdot \sin\left(2\pi \frac{i}{N}\right) \quad (9)$$

Модуль теплового импеданса $|Z_T(f)|$ определяется как:

$$|Z_T(f)| = \sqrt{\frac{A^2(f) + B^2(f)}{P_{\text{перем}}}} \quad (10)$$

Пологие участки полученной зависимости будут показывать низкое влияние теплового сопротивления на передачу тепла. Однако полученная зависимость не является наглядной, т.к. проблемная зона имеет лишь чуть больший наклон функции, чем остальные участки.

1.3.6 Контроль компонент теплового сопротивления

Метод определения компонент теплового сопротивления построен на использовании зависимости частоты абсолютного значения теплового импеданса $Z_T(f)$, а так же его действительной части $Re Z(f)$ и угла фазы $\varphi(f)$. Влияние компонентов конструкции, вносящие тепловое сопротивление в функциях $Z_T(f)$ и $ReZ(f)$ выглядит как наличие пологих участков этих зависимостей, а в функции $\varphi(f)$ – в наличии локальных экстремумов. Данные особенности частотных функций определяются при частотном дифференцировании на частоте модуляции. В отличие от стандартного метода контроля теплового сопротивления, данные о тепловом сопротивлении каждого компонента конструкции отображаются сразу в трёх частотных функциях – $Z_T(f)$, $ReZ(f)$ и $\varphi(f)$. Для определения теплового сопротивления по трем функциям проведено

математическое моделирование аналога тепловой схемы для трёх компонент по схеме Фостера (рисунок 20.а). Данные функции определяются следующими выражениями:

$$Z_T(j2\pi f) = \sum_{i=1}^3 \frac{R_{TSC}}{1 + j2\pi f\tau_{SC}} \quad (11)$$

$$Z_T(\omega) = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^3 \frac{R_{Tj}}{1 + j2\pi f\tau_j}\right)^2 + \omega^2 \left(\sum_{i=1}^3 \frac{R_{Tj}}{1 + j2\pi f\tau_j}\right)^2} \quad (12)$$

$$tg\varphi(\omega) = \frac{ImZ_T}{ReZ_T} = \omega \sum_{i=1}^3 \frac{R_{TSC}}{1 + (j2\pi f)^2\tau_{SC}^2} \left(\sum_{i=1}^3 \frac{R_{TSC}}{1 + (j2\pi f)^2\tau_{SC}^2}\right)^{-1} \quad (13)$$

Для примера проводилось моделирование при двух вариантах параметров общего теплового сопротивления и постоянных времени каждого компонента, определяющих вид частотной зависимости $Z_T(f)$ и угла фазы $\varphi(f)$ теплового импеданса. В первом случае тепловые сопротивления для каждого компонента были взяты $RT_i = \{2,5; 3,5; 4,0\}$ К/Вт, а постоянные времени $\tau_i = \{0,005; 0,1; 3,0\}$ с. Во втором случае $RT_i = \{0,5; 1,0; 6,5\}$ К/Вт; $\tau_i = \{0,005; 0,08; 1,5\}$ с.

Графики функций приведены на рисунке 22.

Функции $Z_T(f)$ и $ReZ_T(f)$ для первого случая выбранных параметров (кривая 1 на рисунке 22а) не обладают острыми точками и имеют плавный характер изменения функций.

Для второго случая выбора параметров (кривая 2 на рисунке 22а) характерен резкий спад в области частот 0,05–1 Гц, полученная характеристика не имеет пологих участков изменения функций.

Функция $\varphi(f)$ в каждом случае имеет четко выраженные экстремумы. Графики $\varphi(f)$ для параметров модели представлены на рисунке 22б. Для выявления особенностей каждой функции, приведённых на рисунке 22, необходимо провести дифференцирование каждой функции по логарифму

частоты импульсов подводящей греющей мощности. Графики дифференцирования функций приведены на рисунке 23.

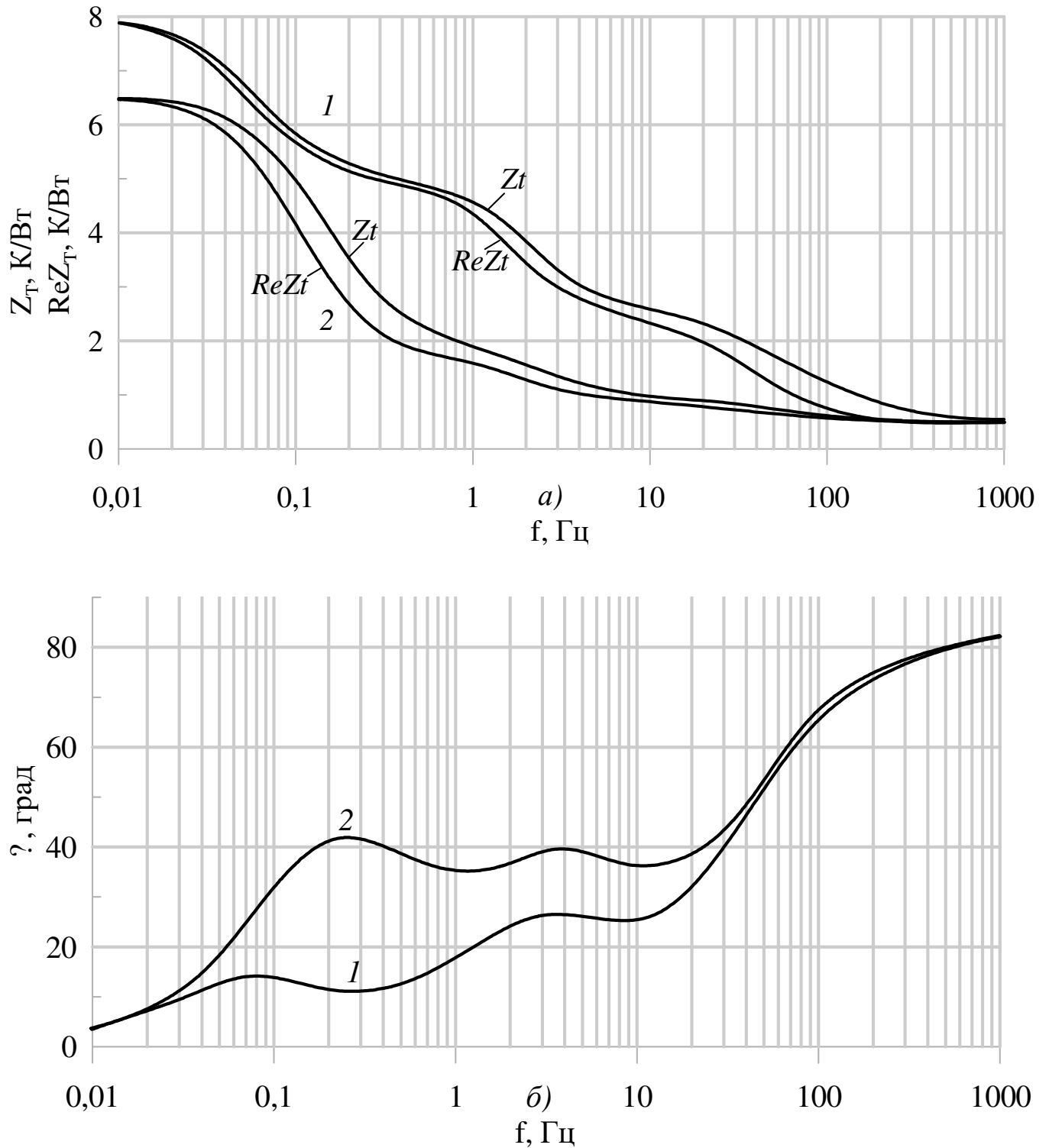


Рисунок 22. Частотная функция общего теплового импеданса для 3-х звенной модели: а) для модуля Z_T и вещественной части $Re Z_T$; б) для фазы φ (кривые 1 – для 1-го варианта выбора параметров, кривые 2 – для 2-го варианта выбора параметров).

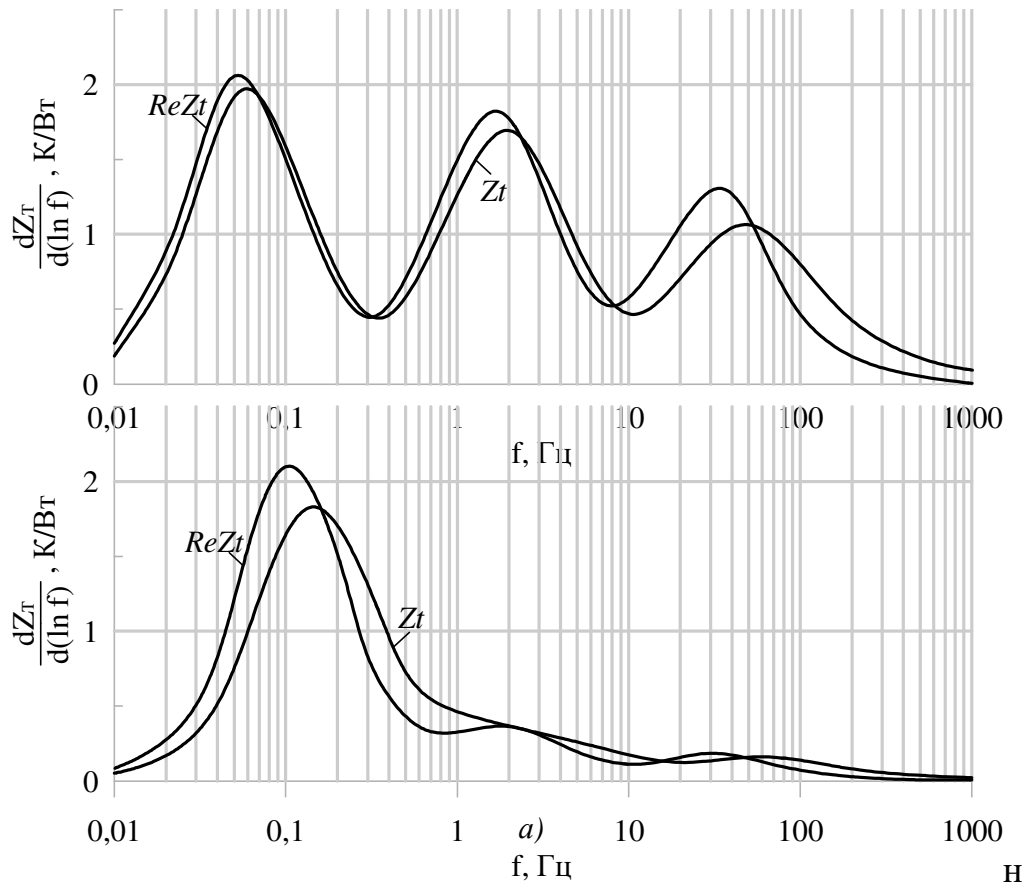


Рисунок 23. Частотные зависимости производных частотной функции: а) для модуля Z_T и вещественной части ReZ_T ; б) для фазы φ (вверху – 1-й вариант набора параметров, внизу – 2-й вариант набора параметров)

После дифференцирования проводится спектральный анализ, и определяются частоты, при которых производные имеют локальные экстремумы. После этого вычислялись значения теплового сопротивления в точках локального экстремума производной функции Z_T части теплового импеданса. Результаты анализа для каждого случая представляют собой гистограмму и приведены на рисунке 24. Так же, для полученных значений, определённого каждым способом, приведено процентное отклонение.

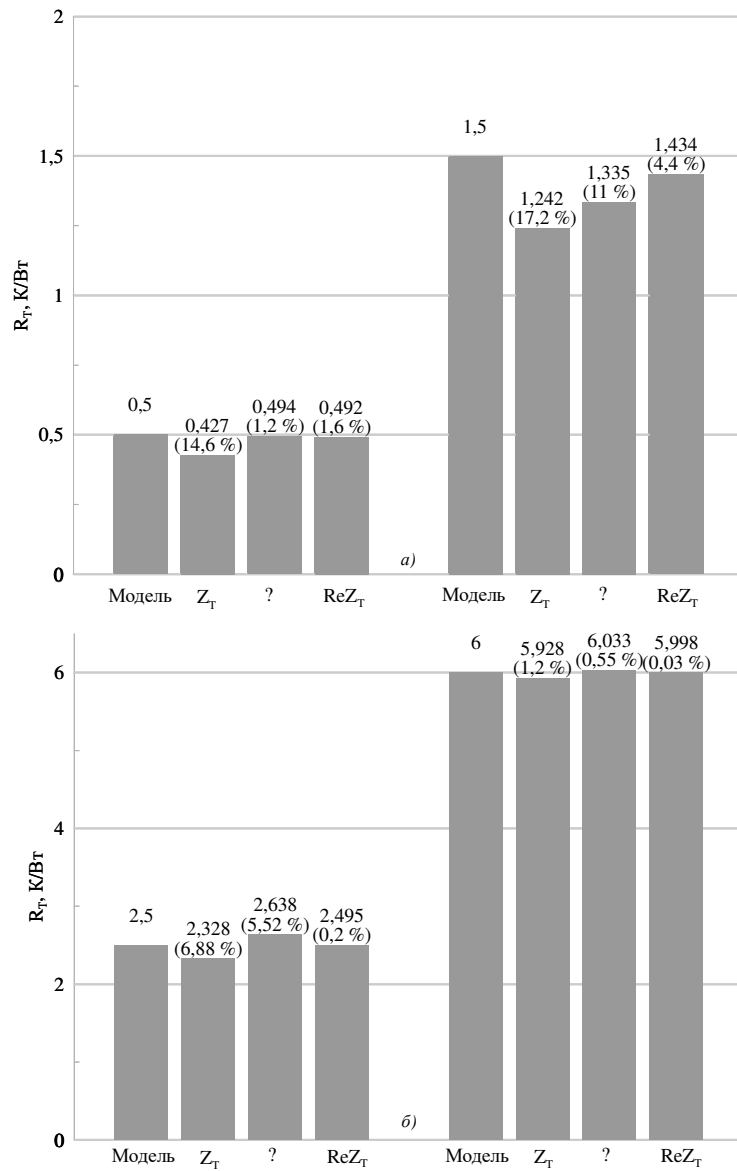


Рисунок 24. Результаты определения компонент теплового сопротивления: а) первый вариант параметров тепловой модели; б) второй вариант параметров тепловой модели

ВЫВОДЫ

Сравнительный анализ существующих методов контроля теплофизических параметров термоинтерфейса показал, что существующие методы имеют недостатки, не позволяющие осуществлять контроль теплофизических параметров термоинтерфейса для любых типов приборов после монтажа корпуса и радиатора. Для решения данной проблемы необходимо создать модель, описывающую процессы теплопереноса и на основе предложенной модели провести исследования на влияние теплофизических параметров термоинтерфейса на термоЭДС, возникающую между корпусом прибора и радиатора. Разработке модели и исследованию термоЭДС от теплофизических параметров термоинтерфейса, размеров и свойств материала исследуемых объектов будет посвящена следующая глава.

ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МЕТОДА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМОИНТЕРФЕЙСА

2.1. Теоретические основы применения термоэлектрического метода для контроля теплофизических параметров термоинтерфейса

Качество теплопроводящего компаунда характеризуется тепловым сопротивлением между корпусом полупроводникового прибора и радиатором охлаждения R_S . На пути прохождения через тело теплового потока, вызванного разностью температур, падение температуры между двумя участками будет характеризовать тепловое сопротивление. Если знать разницу температур на границах термоинтерфейса, то можно узнать тепловое сопротивление «корпус-радиатор». При передаче избыточного тепла, тепловое сопротивление в установившемся режиме определяется по формуле [31, 35]:

$$R_S = \frac{\Delta T}{P} \quad (14)$$

где ΔT – разность температур;

P – тепловой поток мощности, проходящий через тело;

Для измерения разницы температур на границах слоя термоинтерфеса можно установить датчик температуры так, что бы он касался только корпуса полупроводникового прибора максимально близко к теплопроводящему компаунду и не касался нагреваемого радиатора. Однако, установка температурного датчика таким способом усложняет процесс контроля и вносит погрешность в результат контроля теплового сопротивления термоинтерфейса, т.к. часть тепла рассеется в корпусе полупроводникового прибора до датчика температуры [91].

Минимальный слой термоинтерфейса, заполняемый микротрещины поверхностей радиатора и корпуса прибора достигается в том случае, если они имеют несколько точек соприкосновения друг с другом (рисунок 25) т.к. при этом

достигается минимально-возможный зазор между двумя поверхностями. В таком случае можно сказать, что, если достигнут контакт двух металлов с достаточно низким удельным электрическим сопротивлением, то электрическое сопротивление между двумя поверхностями становится значительно ниже, чем электрическое сопротивление теплопроводящего компаунда. Это говорит о том, что при снижении электрического сопротивления до уровня электрического сопротивления материала корпуса и радиатора, достигается оптимальное сопряжение неровностей поверхности и как следствие – минимальное тепловое сопротивление «корпус-радиатор»

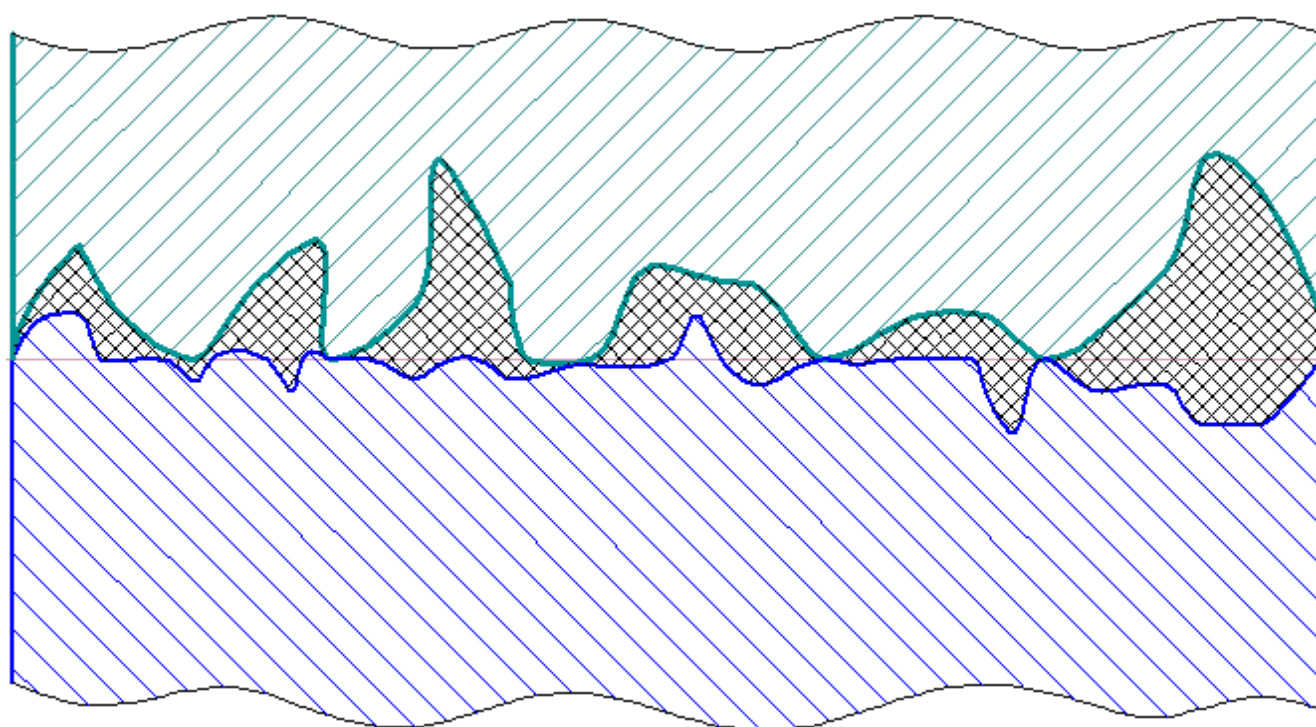


Рисунок 25. Схематическое обозначение соединения радиатора и полупроводникового прибора через слой теплопроводящего компаунда.

При соприкосновении двух проводников различной химической природы из-за разности носителей заряда на внешнем уровне, между разнородными проводниками появляется термоЭДС [53, 78]. Из-за влияния температуры проводника на концентрацию носителей заряда на внешнем уровне, значение электродвижущей силы в данном случае будет напрямую зависеть от температуры по формуле [56, 36, 39]:

$$E = (T_2 - T_1) \frac{k}{e} \ln \frac{n_2}{n_1}; \quad (15)$$

где T_2 – температура горячего спая;
 T_1 – температура холодного спая;
 k – постоянная Больцмана;
 e – заряд электрона;
 n_1 – концентрация носителей материала радиатора;
 n_2 – концентрация носителей материала корпуса.

Величина

$$\frac{k}{e} \ln \frac{n_2}{n_1}$$

является постоянной для двух проводников, называется коэффициентом термоЭДС или коэффициентом Зеебека [6, 55] и обозначается α . Формула (15) сокращается до вида:

$$E = (T_2 - T_1) \times \alpha. \quad (16)$$

Для того, что бы рассчитать коэффициент Зеебека, помимо приведенных выше физических констант необходимо знать значения концентраций носителей заряда первого и второго материала проводника соответственно. Для простых металлов концентрация носителей зависит от количества электронов на внешнем уровне атома вещества согласно формуле [42, 25]:

$$n = \frac{\rho \times N_A}{M_A},$$

где n – концентраций носителей заряда;
 ρ – плотность вещества;
 N_A – число Авогадро;
 M_A – молярная масса вещества;

Однако при превышении уровня энергии Ферми, концентрация носителей может увеличиваться в соответствии с распределение Ферми – Дирака [75, 43, 24]. Для удобства пользования в популярных источниках литературы приведены

основные значения коэффициента Зеебека относительно свинца, т.к. свинец не создаёт разности потенциалов между его холодным и горячим концами [61, 90].

При контакте корпуса полупроводникового прибора, изготовленного или поверхность которого покрыта токопроводящим материалом, состав которого будет отличным от токопроводящего материала радиатора, в месте соприкосновения полупроводникового прибора и радиатора так же возникнет термоЭДС [80]. Выразив ΔT из формулы (16) ($\Delta T = T_2 - T_1$) и подставив в формулу (14), получим:

$$R_S = \frac{E}{\alpha \times P} \quad (17)$$

Как видно из формулы (17), величину теплового сопротивления можно определить из величины термоЭДС между разными соприкасающимися металлами корпуса прибора и радиатора охлаждения. При известном потоке мощности через тело P , измерив термоЭДС между корпусом прибора и радиатором охлаждения можно получить значение теплового сопротивления.

Тепловой поток мощности P представляет собой количество теплоты, проходящее через некоторую площадь тела за единицу времени и определяется основным уравнением теплопередачи для стационарного режима [8]:

$$P = KS\Delta T \quad (18)$$

где K – коэффициент теплопередачи;

S – площадь соприкасаемых поверхностей прибора и радиатора;

Коэффициент теплопередачи зависит от типа материала и показывает количество теплоты переходящее от горячего участка одного тела к холодному участку другого тела в единицу времени через 1 м^2 теплообменной поверхности при разности температур между теплоносителями 1 .

В простейшем случае, коэффициент теплопередачи K при передаче тепла через однослойную плоскую стенку вычисляется по формуле:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{h}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (19)$$

где h – толщина термоинтерфейса;

α_1 – коэффициент теплоотдачи от радиатора к термоинтерфейсу;

α_2 – коэффициент теплоотдачи от термоинтерфейса к корпусу полупроводникового прибора.

Для тела, состоящих из нескольких n слоев разных материалов, коэффициент теплопередачи K вычисляется по формуле:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (20)$$

где λ – коэффициент теплопроводности термоинтерфейса.

Таким образом, с учётом формулы (19) тепловое сопротивление, однородного тела рассчитанное по формуле (17) будет представлено как:

$$R_S = \frac{E \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{h}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right)}{\alpha \times S} \quad (21)$$

Тепловое сопротивление нескольких соединённых тел с разной теплопроводностью с учётом формулы (20) определяется как:

$$R_S = \frac{E \left(\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2} \right)}{\alpha \times S} \quad (22)$$

Исходя из формул (21) и (22), тепловое сопротивление термоинтерфейса в зазоре между полупроводниковым прибором и радиатором охлаждения зависит от: разницы температур на границах слоя термоинтерфейса, выраженная через термоЭДС, удельной теплопроводности термоинтерфейса, состава покрытия материала корпуса полупроводникового прибора, покрытия материала радиатора и их теплопроводности [47].

2.2. Разработка модели для исследования термоЭДС при контроле теплофизических параметров термоинтерфейса

Для определения зависимости распространения тепла в исследуемом объекте с течением времени, а так же его зависимости от теплового сопротивления термоинтерфейса построим математическую модель, в которой два цилиндра радиусом R и высотой L_1 и L_2 соединены между собой (рисунок 26). В модели считаем, что нижний цилиндр с высотой L_1 в точках A и D нагревается мгновенно до 100 C , имитируя помещение в кипящую воду. Тепло передаётся к верхнему цилиндру с высотой L_2 , а часть нижнего цилиндра в точках D и B охлаждаются воздухом с температурой, соответствующей нормальным климатическим условиям. В точке контакта цилиндров находится теплопроводящий слой толщиной l_s , (расстояние B_1B_2 на рисунке 26).

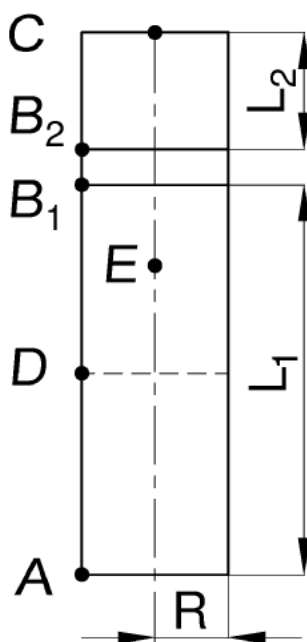


Рисунок 26. Схематическое изображение объекта исследования в математической модели

Предположения математической модели: контакт между цилиндрами идеальный, коэффициенты теплопроводности веществ не зависят от температуры и являются постоянными, температура кипящей воды постоянна и равна 100 C и

тепловое сопротивление, возникающее в зоне контакта двух цилиндров полностью описывается эффективным сопротивлением контактного слоя [59].

С учетом сделанных предположений, математическая модель в размерной постановке может быть записана в следующем виде [32]:

$$c_1 \rho_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} - \frac{2\alpha_{H_2O} (T_1 - T_{H_2O})}{R} \Big|_{A \leq x \leq D} - \frac{2\alpha_{\text{возд}} (T_1 - T_{\text{возд}})}{R} \Big|_{D < x \leq C}, \quad (23)$$

$$c_2 \rho_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} - \frac{2\alpha_{\text{возд}} (T_2 - T_{\text{возд}})}{R}, \quad (24)$$

$$c_s \rho_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \lambda_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2}. \quad (25)$$

С начальными условиями:

$$T(x, 0) = T_{\text{возд}} \quad (26)$$

и граничными условиями:

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1(0, t)}{\partial x} = \alpha_{H_2O} (T_1(0, t) - T_{H_2O}), \quad (27)$$

$$-\lambda_2 \frac{\partial T_2(0, t)}{\partial x} = \alpha_{\text{возд}} (T_2(0, t) - T_{\text{возд}}), \quad (28)$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial T(B_1^-, t)}{\partial x} = -\lambda_s \frac{\partial T(B_1^+, t)}{\partial x}, \quad (29)$$

$$-\lambda_s \frac{\partial T(B_2^-, t)}{\partial x} = -\lambda_2 \frac{\partial T(B_2^+, t)}{\partial x}. \quad (30)$$

В системе (23)–(30) приняты следующие обозначения:

c – удельная теплоемкость,

ρ – плотность,

λ – теплопроводность

α – коэффициент конвективной теплоотдачи (H_2O – для воды, *возд.* – для воздуха,

R – радиус,

T – температура,

x – координата,

t – время,

a – коэффициент температуропроводности.

В системе (23)–(30) приняты следующие индексы:

H_2O – вода;

возд. – воздух;

0 – начальное условие;

1 –цилиндр с длиной L_1 ;

2 –цилиндр с длиной L_2 ;

s – теплопроводящий слой;

* – масштаб.

Система уравнений (23)–(30) в безразмерном виде [70]:

$$\frac{\partial \theta_1}{\partial t} = \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial \xi^2} - Bi_1 H (\theta_1 - 1) \Big|_{\frac{A}{L} \leq \xi \leq \frac{D}{L}} - Bi_2 H \left(\theta_1 - \frac{T_{\text{возд}}}{T_{H_2O}} \right) \Big|_{\frac{D}{L} < \xi \leq \frac{C}{L}}, \quad (31)$$

$$\frac{\partial \theta_2}{\partial t} = \frac{a_2}{a_1} \frac{\partial^2 \theta_2}{\partial \xi^2} - Bi_2 H \left(\theta_2 - \frac{T_{\text{возд}}}{T_{H_2O}} \right), \quad (32)$$

$$\frac{\partial \theta_s}{\partial t} = \frac{a_s}{a_1} \frac{\partial^2 \theta_s}{\partial \xi^2}. \quad (33)$$

Начальные условия:

$$\theta(\xi, 0) = \frac{T_{\text{возд}}}{T_{H_2O}} \quad (34)$$

Граничные условия:

$$\frac{\partial \theta_1(0, \tau)}{\partial \xi} = Bi_1 (\theta_1(0, \tau) - 1) \quad (35)$$

$$\frac{\partial \theta_2(1, \tau)}{\partial \xi} = Bi_2 \left(\theta_2(1, \tau) - \frac{T_{\text{возд}}}{T_{H_2O}} \right) \quad (36)$$

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_s} \frac{\partial \theta_1(B_1^-, \tau)}{\partial \xi} = \frac{\partial \theta_s(B_1^+, \tau)}{\partial \xi_s} \quad (37)$$

$$\frac{\lambda_s}{\lambda_2} \frac{\partial \theta_s(B_2^-, \tau)}{\partial \xi_s} = \frac{\partial \theta_2(B_2^+, \tau)}{\partial \xi} \quad (38)$$

Для приведения системы уравнений (31)–(38) к безразмерному виду были использованы следующие масштабы [58]:

$x^* = L_1 + L_2 = L$ – масштаб координаты,

$t^* = \frac{c_1 \rho_1 L^2}{\lambda_1}$ – времени,

$T^* = T_{H_2O}$ – температуры.

Безразмерные переменные:

$\xi = \frac{x}{x^*}$ – координата,

$\tau = \frac{t}{t^*}$ – время,

$\theta = \frac{T}{T_{H_2O}}$ – температура.

В результате обезразмеривания (31)–(38) были получены следующие безразмерные параметры: $Bi = \frac{\alpha L}{\lambda}$ – критерий Био, описывает отношение

теплового сопротивления вещества к конвекции внешней среды, $H = \frac{2L}{R}$ –

удвоенное отношение общей длины цилиндров к их радиусу, \bar{A} – отношение коэффициентов температуропроводности материалов.

Для решения задачи (23)–(30) воспользуемся методом конечных разностей с использованием явной схемы [27].

Конечно – разностный аналог (31)–(38) запишется следующим образом:

$$\frac{\theta_i^{n+1} - \theta_i^n}{\tau} = \bar{A}\bar{\theta} - Bi_1 H \left(\theta_i^{n+1} - 1 \right) \Big|_{\frac{A}{L} \leq \xi \leq \frac{D}{L}} - Bi_2 H \left(\theta_i^{n+1} - \frac{T_{\text{возд}}}{T_{H_2O}} \right) \Big|_{\frac{D}{L} < \xi \leq \frac{C}{L}} \quad (39)$$

Значения параметра \bar{A} в зависимости от координаты:

$$\bar{A} = \begin{cases} 1, & \xi_A \leq \xi < \xi_{B_1} \\ \frac{a_s}{a_1}, & \xi_{B_1} \leq \xi \leq \xi_{B_2}; \\ \frac{a_2}{a_1}, & \xi_{B_2} < \xi \leq \xi_D \end{cases} \quad (40)$$

Конечно-разностная аппроксимация второй производной для цилиндров и в точках контакта цилиндров с теплопроводящим слоем:

$$\bar{\theta} = \begin{cases} \frac{\theta_{i+1}^{n+1} - 2\theta_i^{n+1} + \theta_{i-1}^{n+1}}{h^2}, & \xi_A \leq \xi < \xi_{B_1}, \xi_{B_2} < \xi \leq \xi_D \\ \left(\frac{\theta_{i+1}^{n+1} - \left(1 + \frac{h_s}{h}\right)\theta_i^{n+1} + \frac{h_s}{h}\theta_{i-1}^{n+1}}{h_s \frac{h_s + h}{2}} \right), & \xi = \xi_{B_1} \\ \left(\frac{\frac{h_s}{h}\theta_{i+1}^{n+1} - \left(1 + \frac{h_s}{h}\right)\theta_i^{n+1} + \theta_{i-1}^{n+1}}{h \frac{h_s + h}{2}} \right), & \xi = \xi_{B_2} \end{cases} \quad (41)$$

Начальные условия:

$$\theta_i(\xi, 0) = \frac{T_{\text{возд}}}{T_{H_2O}} \quad (42)$$

Граничные условия:

$$\frac{\theta_1^{n+1} - \theta_2^{n+1}}{h} = Bi_1 (\theta_1^n - 1) \quad (43)$$

$$\frac{\theta_{N-1}^{n+1} - \theta_N^{n+1}}{h} = Bi_2 \left(\theta_N^n - \frac{T_{\text{возд}}}{T_{H_2O}} \right) \quad (44)$$

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_s} \frac{\theta_i^{n+1}(\xi_1, \tau)}{h} = \frac{\partial \theta_{i+1}^{n+1}(\xi_s, \tau)}{h_s} \quad (45)$$

$$\frac{\lambda_s}{\lambda_2} \frac{\theta_{i+1}^{n+1}(\xi_s, \tau)}{h_s} = \frac{\partial \theta_{i+2}^{n+1}(\xi_2, \tau)}{h} \quad (46)$$

При численном решении размер шага по времени контролировался согласно условию Куранта [13]:

$$\frac{\tau}{h^2} \leq 0,5$$

Система уравнений (23)–(30) решается численно по неявной разностной схеме. Для решения уравнений теплопроводности и определения значений температуры на $n+1$ временном слое используется метод прогонки. Вычислительный код реализован на языке программирования Fortran.

Конечно-разностные аппроксимации (39)–(36) могут быть записаны в виде:

$$A_i \theta_{i+1}^{n+1} + B_i \theta_i^{n+1} + C_i \theta_{i-1}^{n+1} = d_i \quad (47)$$

где θ – искомая переменная;

A, B, C – коэффициенты;

d – значения правой части, относящиеся к n -тому временному слою.

Неизвестную функцию будем искать с помощью следующего линейного соотношения:

$$\theta_i = \alpha_i \theta_{i+1} + \beta_i, \quad i = n, n-1, \dots, 1. \quad (48)$$

При изменении индекса i на $i-1$ в (48), получаем:

$$\theta_{i-1} = \alpha_{i-1} \theta_i + \beta_{i-1} \quad (49)$$

Подставляя (49) в (47) получаем:

$$A_i \theta_{i+1}^{n+1} + B_i \theta_i^{n+1} + C_i (\alpha_{i-1} \theta_i + \beta_{i-1}) = d_i \quad (50)$$

Из (49) выражаем θ_i :

$$\theta_i = \frac{-A}{B_i + C_i \alpha_{i-1}} \theta_{i+1} + \frac{d_i - C_i \beta_{i-1}}{B_i + C_i \alpha_{i-1}} \quad (51)$$

Чтобы найти значения θ_i потребуется произвести следующие вычисления [20]:

1. Прямой ход прогонки.

Значения коэффициентов $\alpha_i, \beta_i, i = 2, \dots, n$ находятся по формуле (50), α_1, β_1 определяются из разностной аппроксимации граничных условий (51).

2. Обратный ход прогонки.

По значениям α_i, β_i согласно (48) вычисляются значения θ_i .

Далее представлены соотношения (39)–(46) приведенные к виду (47).

$$\theta_{i+1}^{n+1} \overline{A}_i + \theta_i^{n+1} \overline{B}_i + \theta_{i-1}^{n+1} \overline{C}_i = \overline{d}_i \quad (52)$$

Коэффициенты $\overline{A}_i, \overline{B}_i, \overline{C}_i, \overline{d}_i$ в соответствие с координатой:

$$\overline{A}_i = \begin{cases} \frac{\tau}{h^2}, \xi < \xi_{B_1} \\ \frac{\tau}{\left(h_s \frac{h_s + h}{2}\right)} \frac{a_s}{a_1}, \xi = \xi_{B_1} \\ \frac{\tau}{\left(h \frac{h_s + h}{2}\right)} \frac{a_s}{a_1}, \xi = \xi_{B_2} \\ \frac{\tau}{h^2} \frac{a_2}{a_1}, \xi > \xi_{B_2} \end{cases}$$

$$\overline{B}_i = \begin{cases} -\left(2 \frac{\tau}{h^2} + 1 + \tau H (Bi_1 + Bi_2)\right), \xi < \xi_{B_1} \\ -\left(\left(1 + \frac{h_s}{h}\right) \frac{\tau}{\left(h_s \frac{h_s + h}{2}\right)} \frac{a_s}{a_1} + 1 + \tau Bi_2 H\right), \xi = \xi_{B_1} \\ -\left(\left(1 + \frac{h_s}{h}\right) \frac{\tau}{\left(h \frac{h_s + h}{2}\right)} \frac{a_s}{a_1} + 1 + \tau Bi_2 H\right), \xi = \xi_{B_2} \\ -\left(2 \frac{\tau}{h^2} \frac{a_3}{a_1} + 1 + \tau Bi_2 H\right), \xi > \xi_{B_2} \end{cases}$$

$$\overline{C}_i = \begin{cases} \frac{\tau}{h^2}, \xi < \xi_{B_1} \\ \frac{\tau}{\left(h_s \frac{h_s + h}{2}\right)} \frac{a_s}{a_1}, \xi = \xi_{B_1} \\ \frac{\tau}{\left(h \frac{h_s + h}{2}\right)} \frac{a_s}{a_1}, \xi = \xi_{B_2} \\ \frac{\tau}{h^2} \frac{a_2}{a_1}, \xi > \xi_{B_2} \end{cases} \quad \overline{d}_i = \begin{cases} -\theta_i^n - \tau Bi_1 H - \tau Bi_2 H \left(\frac{T_{603\partial}}{T_{H_2O}}\right), \xi \leq \xi_D \\ -\theta_i^n - \tau Bi_2 H \left(\frac{T_{603\partial}}{T_{H_2O}}\right), \xi > \xi_D \end{cases}$$

Для реализации граничных условий зададим значения коэффициентов α_i, β_i :

$$\alpha_i = \begin{cases} 1, \xi = \xi_A \\ \frac{h}{h_s} \frac{\lambda_s}{\left(\lambda_1 (1 - \alpha_{i-1}) + \frac{h}{h_s} \lambda_s \right)}, \xi = \xi_{B_1} \\ \frac{h_s}{h} \frac{\lambda_2}{\left(\lambda_s (1 - \alpha_{i-1}) + \frac{h_s}{h} \lambda_2 \right)}, \xi = \xi_{B_2} \\ 1, \xi = \xi_C \end{cases} \quad \beta_i = \begin{cases} -hBi_1 (\theta_1^n - 1), \xi = \xi_A \\ \frac{\beta_{i-1}}{\left((1 - \alpha_{i-1}) + \frac{h}{h_s} \frac{\lambda_s}{\lambda_1} \right)}, \xi = \xi_{B_1} \\ \frac{\beta_{i-1}}{\left((1 - \alpha_{i-1}) + \frac{h_s}{h} \frac{\lambda_2}{\lambda_s} \right)}, \xi = \xi_{B_2} \\ -hBi_2 \left(\theta_N^n - \frac{T_{возд}}{T_{H_2O}} \right), \xi = \xi_C \end{cases}$$

2.3. Исследование распределения температурного поля в объекте контроля при изменении теплового сопротивления термоинтерфейса

Задав параметры цилиндров $R=25$ мм, $AC=20$ см, $AB_1=19,5$ см, $AE=19$ см, $AD=9,5$ см, свойства материала цилиндров соответствующие свойствам материала АМг6, свойства материала теплопроводящего слоя – соответствующие свойствам термопасты КПТ-8 с толщиной нанесения – 0,05 мм получим по результатам расчётов температурный срез распространения тепла в цилиндре, являющимся соединением цилиндров с длинами L_1 и L_2 , соединёнными через слой термоинтерфейса. Расчёты проводились в пробной версии программы Intel Parallel Studio на языке Fortran. Температурный срез распределения тепла приведён на рисунке 27 [14].

Как видно из полученного температурного среза, эффективное распространение тепла в районе 0,09 м ухудшено из-за низкого теплового сопротивления термоинтерфейса по сравнению с тепловым сопротивлением цилиндров. Данная картина наглядно показывает влияние теплового сопротивления термоинтерфейса на отвод тепла.

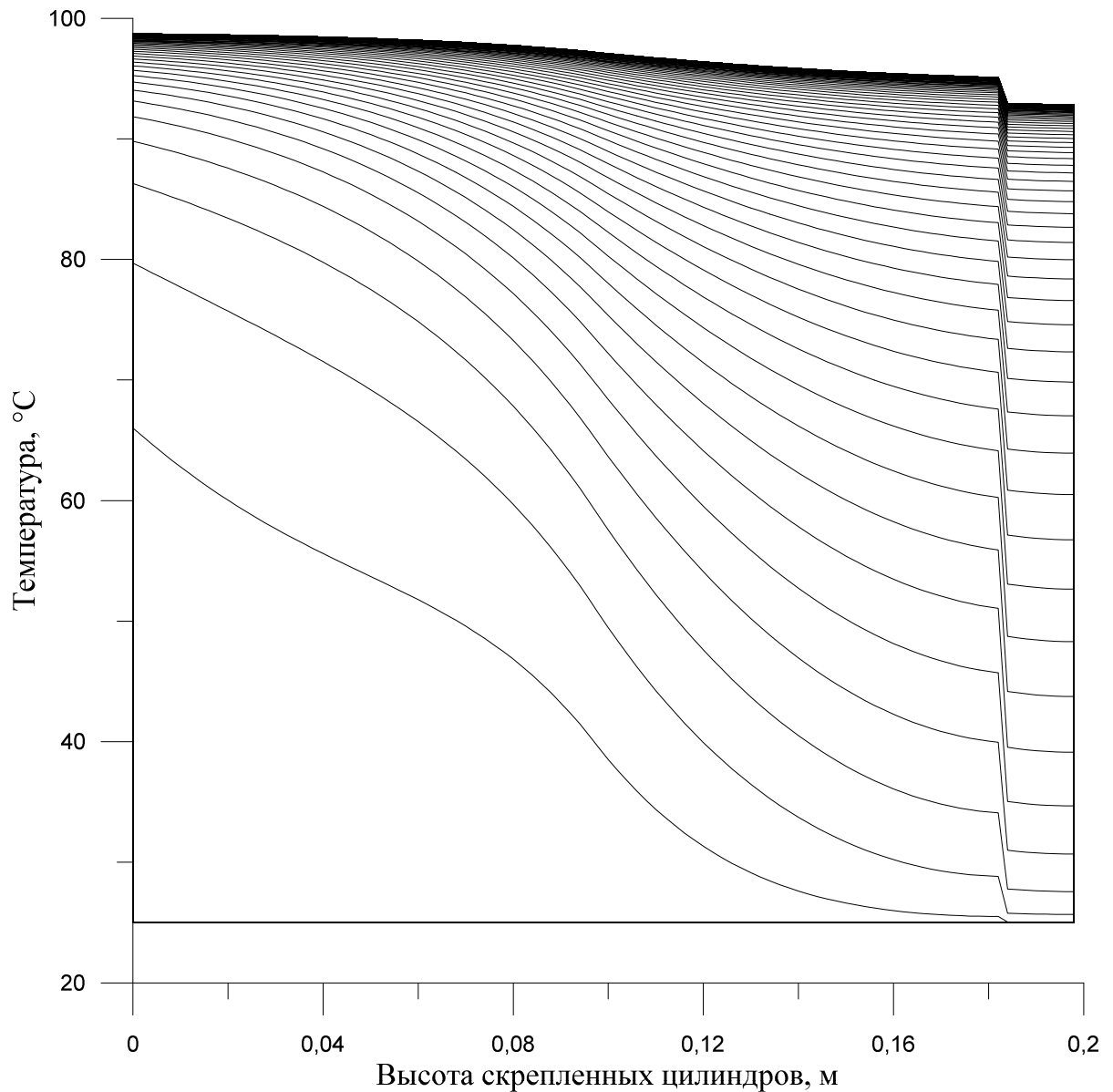


Рисунок 27. Температурно-временной срез в объекте цилиндрической формы

Каждая линия на данном графике отображает график температуры в каждой точке исследуемого тела в разный момент времени с интервалом в 10 секунд

Для наглядности на рисунке 28 приведена разница температур на границах слоя термоинтерфейса в точках B_1 и B_2 .

Как видно из рисунка 28, максимальная разница температур составила 15,5 С, время установления переходного процесса около 200 с, а разница температур в установившемся режиме – 3,75 С.

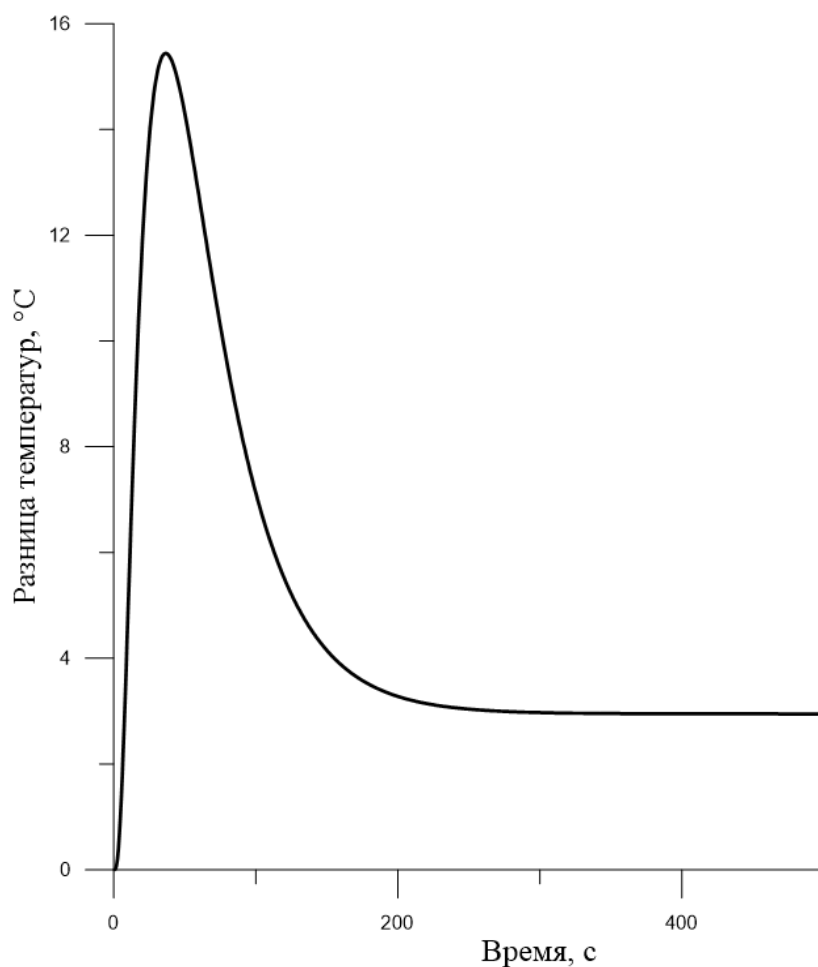


Рисунок 28. Зависимость разницы температур от времени на границах термоинтерфейса

Результаты исследования изменения разницы температур на границах термоинтерфейса от времени, при увеличении и уменьшении теплопроводности материала термоинтерфейса в 10 раз приведены на рисунке 29.

Как видно из рисунка 29, при увеличении удельной теплопроводности термоинтерфейса в 10 раз, время установления переходного процесса значительно увеличилось и составило 12 минут. При снижении удельной теплопроводности термоинтерфейса происходит уменьшение температуры при переходном процессе и при установившемся режиме.

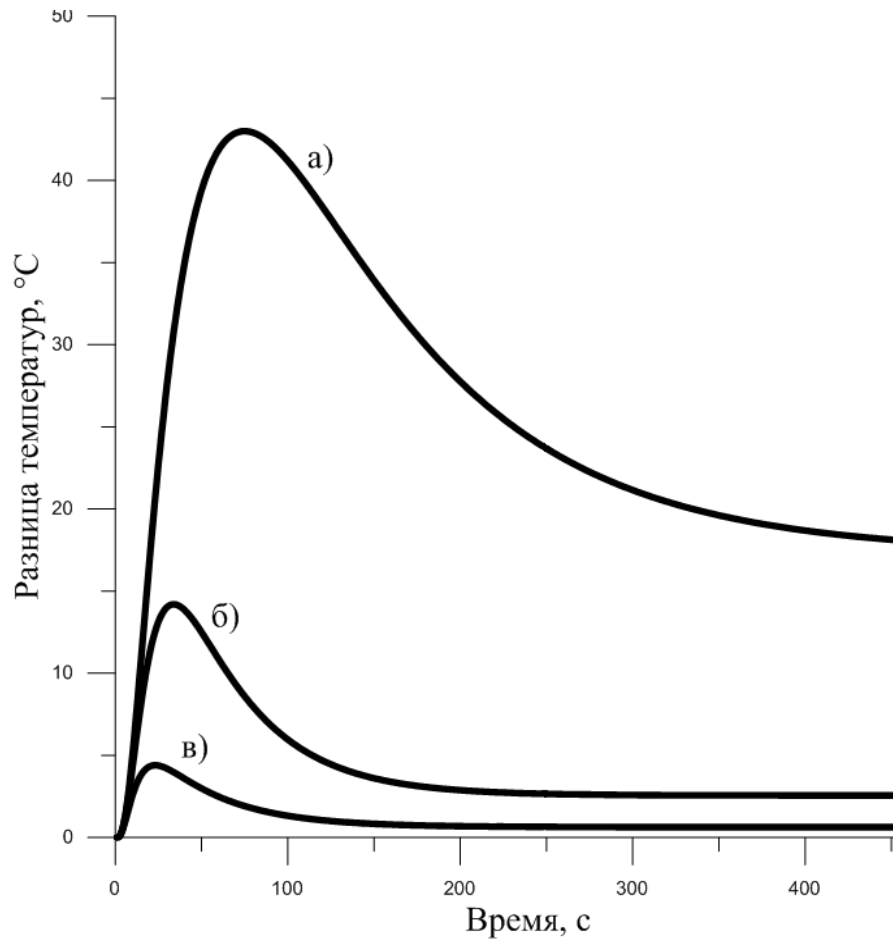


Рисунок 29. График зависимости разницы температур с течением времени:
 а) удельная теплопроводность термоинтерфейса в 10 раз больше номинальной; б)
 для номинальной удельной теплопроводности; в) удельная теплопроводность
 термоинтерфейса в 10 раз меньше номинальной

Тепловое сопротивление так же зависит от толщины теплопроводящего слоя. График зависимости максимальной разности температур (в середине переходного процесса) для предыдущих трёх случаев при изменении слоя термоинтерфейса приведён на рисунке 30 (в логарифмическом масштабе).

Рисунок 30 показывает снижение максимальной разности температур при уменьшении толщины термоинтерфейса, при этом видно характерное снижение разницы температур при уменьшении толщины термоинтерфейса. Полученная характеристика наглядно показывает зависимость количества передачи тепла как от толщины термоинтерфейса, так и от его теплопроводности.

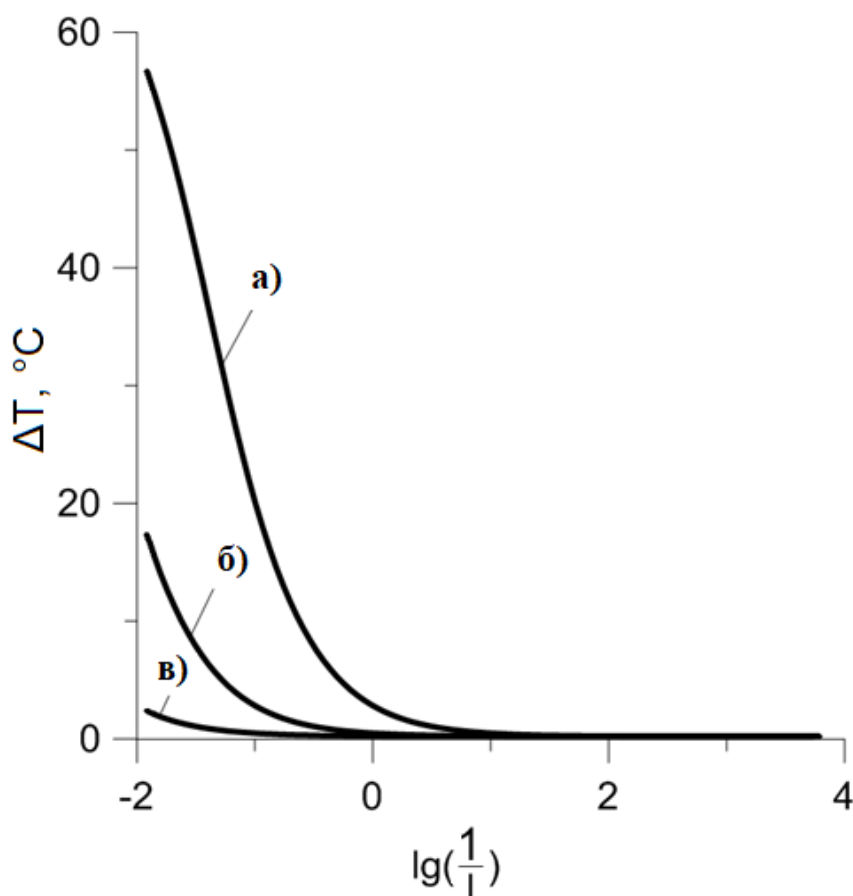


Рисунок 30. График зависимости разницы температур при изменении толщины теплопроводящего слоя: а) теплопроводность термоинтерфейса в 10 раз больше номинальной; б) при номинальной теплопроводности термоинтерфейса; в) теплопроводность термоинтерфейса в 10 раз меньше номинальной

2.4. Описание модели для исследования влияния теплового сопротивления термоинтерфейса на термоЭДС

Для изучения влияния теплового сопротивления термоинтерфейса на термоЭДС, возникающую при нагреве двух тел, состоящих из разнородных металлов, разработана программа, реализующая расчет, представленный в разделе 2.2.

Программа реализована в среде QT. Интерфейс программы, приведен на рисунке 31.

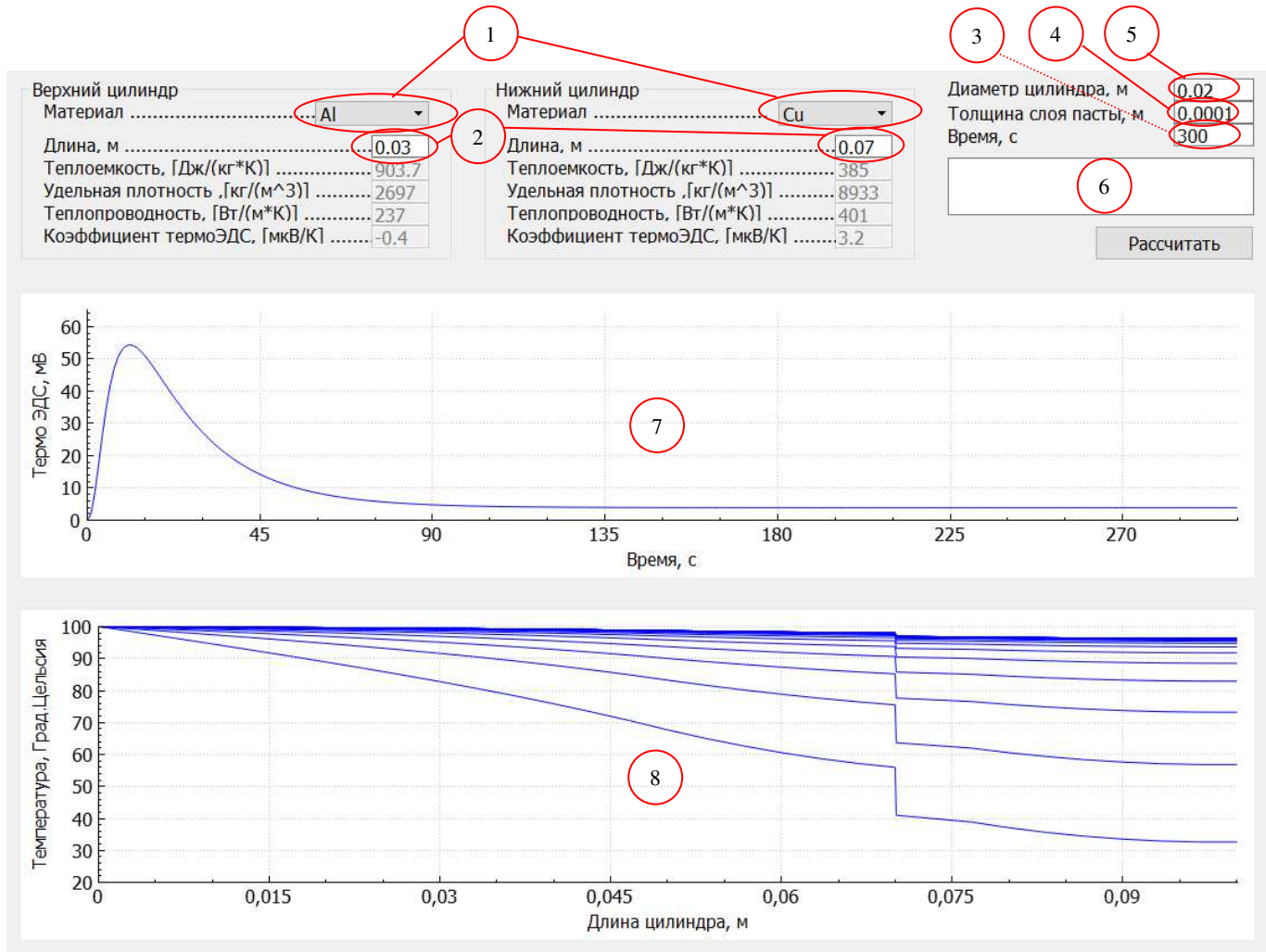


Рисунок 31. Интерфейс программы

Интерфейс программы состоит из следующих элементов:

- Выпадающего списка материалов верхнего и нижнего цилиндров (1). Данные о теплоемкости, удельной плотности, теплопроводности и коэффициенте термоЭДС приведены в базе данных для данной программы, в которой можно изменять параметры внесенных материалов и добавлять новые материалы. Значения параметров так же выводятся в поле ниже, каждый напротив своего обозначения.
- Поля ввода длины каждого цилиндра (2). В это поле вводится длина верхнего и нижнего цилиндра в метрах.

- Поле ввода времени (3). В данном поле пользователь вводит количество времени в секундах, которое будет определять время теплового воздействия на цилиндры.

- Поле ввода толщины слоя термопасты (4). В данное поле пользователь вводит толщину термоинтерфейса в метрах. В расчете принято, что тепловое сопротивление термоинтерфейса полностью определяется тепловым сопротивлением контактного слоя и зависит от его теплопроводности и толщины.

- Поля ввода диаметра цилиндров (5). В это поле вводится диаметр верхнего и нижнего цилиндра в метрах. В данной программе реализован расчет для цилиндров одинакового диаметра.

- Информационное поле (6) выводит информацию об ошибках при работе, если они были.

- Кнопка «Рассчитать». При нажатии на данную кнопку программа начинает расчет для значений, введенных пользователем. После завершения расчета, полученные данные выводятся в поля (7) и (8) в виде графиков, а так же записываются в текстовый файл с расширением *.txt.

- Поле (7) показывает график зависимости возникающей термоЭДС в милливольтках от времени в процессе передаче тепла между цилиндрами.

- Поле (8) показывает температурно–временной срез для двух соединенных цилиндров. Данный график показывает процесс распространения тепла (ось «температура») в каждой точке соединенных цилиндров (ось «Длина цилиндров»). Каждая линия соответствует определенному моменту времени. На рисунке 31 видно, что верхние графики сливаются вместе, что говорит о завершении переходного процесса передачи тепла. Резкий скачок температуры в точке 0,07 м вызван влиянием в этой точке введенного теплового сопротивления.

2.5. Исследование влияния теплового сопротивления термоинтерфейса на термоЭДС

Для исследования влияния теплового сопротивления на термоЭДС рассмотрим следующий случай: материал нижнего цилиндра – алюминий, высота нижнего цилиндра $L_1=7$ см; материал верхнего цилиндра – медь, высота верхнего цилиндра $L_2=3$ см. Радиус обоих цилиндров равен 1 см. Изменяя толщину теплопроводящего слоя в пределах от 0,02 до 0,5 мм, получим значение возникающей термоЭДС для каждого случая (рисунок 32).

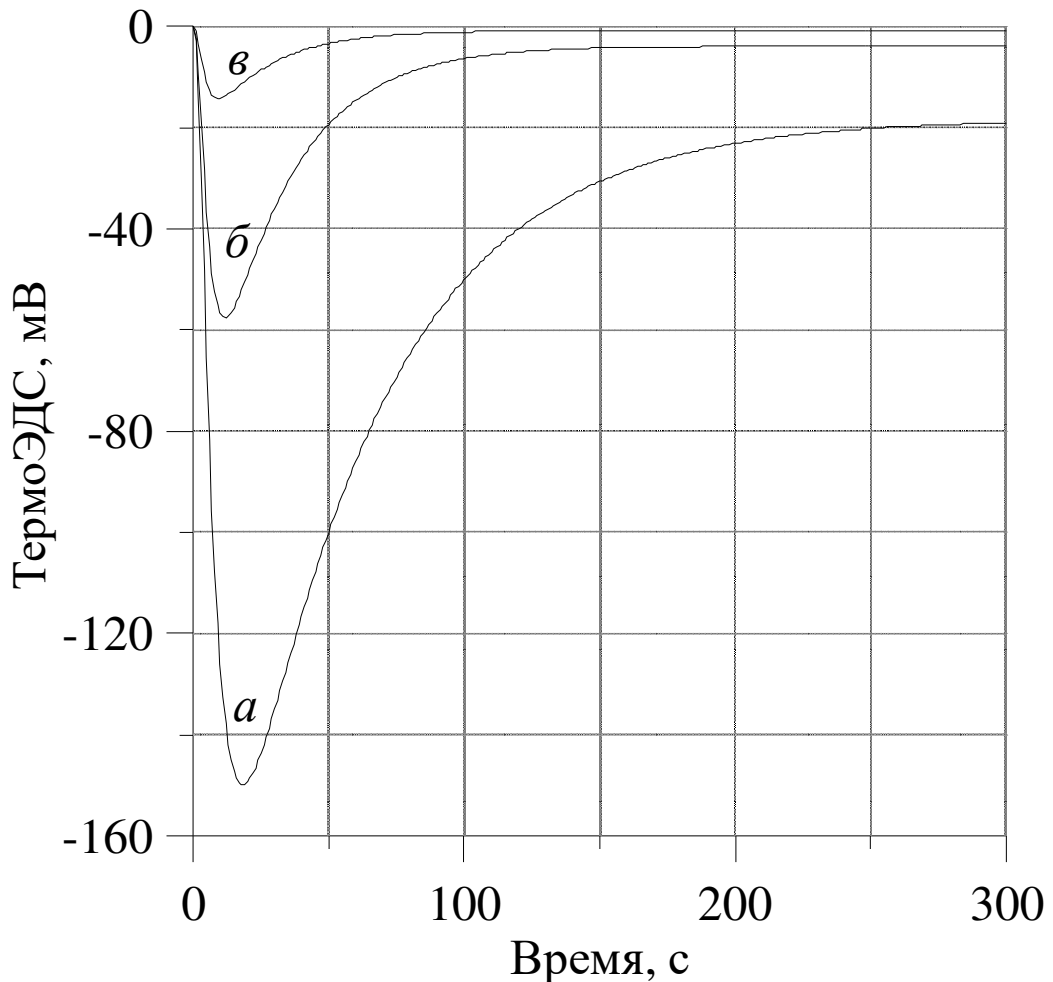


Рисунок 32. ТермоЭДС между телами из алюминия и меди при толщине термоинтерфейса: а) 0,5 мм; б) 0,1 мм; в) 0,02 мм.

Характер термоЭДС аperiodический для каждого случая, при уменьшении теплового сопротивления термоинтерфейса наблюдается снижение возникающей

термоЭДС из-за уменьшения разницы температур на границе слоя термоинтерфейса, вызванного снижением теплового сопротивления.

Кроме того, уменьшается время установления температурного равновесия: в случае с толщиной термоинтерфейса 0,5 мм (кривая *a* на рисунке 32) время завершения процесса составляет около 300 с, в то время как при толщине термоинтерфейса 0,1 мм (кривая *б* на рисунке 32) оно составляет 125 с, а при 0,02 мм (кривая *в* на рисунке 32) – 75 с. Снижение времени установления при снижении теплового сопротивления термоинтерфейса объясняется тем, что снижение теплового сопротивления термоинтерфейса вызывает увеличение количества тепла, проходящего через него за единицу времени.

Постоянная составляющая термоЭДС в конце временной оси характеризует отсутствие изменения разности температур на границах слоя термоинтерфейса. Постоянная часть термоЭДС в таком случае относительно мала по отношению к максимальной возникающей термоЭДС во время переходного процесса, но она так же характеризует тепловое сопротивление термоинтерфейса.

На рисунке 33 приведен график зависимости максимально возникающей термоЭДС во время переходного процесса от толщины слоя термоинтерфейса. Данный график показывает нелинейную зависимость возникающей термоЭДС при уменьшении толщины термоинтерфейса. В начале графика, при тонком слое термоинтерфейса наблюдается небольшое значение термоЭДС, но крутизна характеристики максимальна, что может быть использовано в дальнейшем для определения теплофизических параметров термоинтерфейса при тонком слое, например при установке на радиатор охлаждения силовых элементов преобразовательной техники, процессора персонального компьютера и др. С увеличением толщины термоинтерфейса наклон графика снижается, но возрастает величина возникающей термоЭДС, что может быть использовано в дальнейшем для метода определения наличия или отсутствия термоинтерфейса.

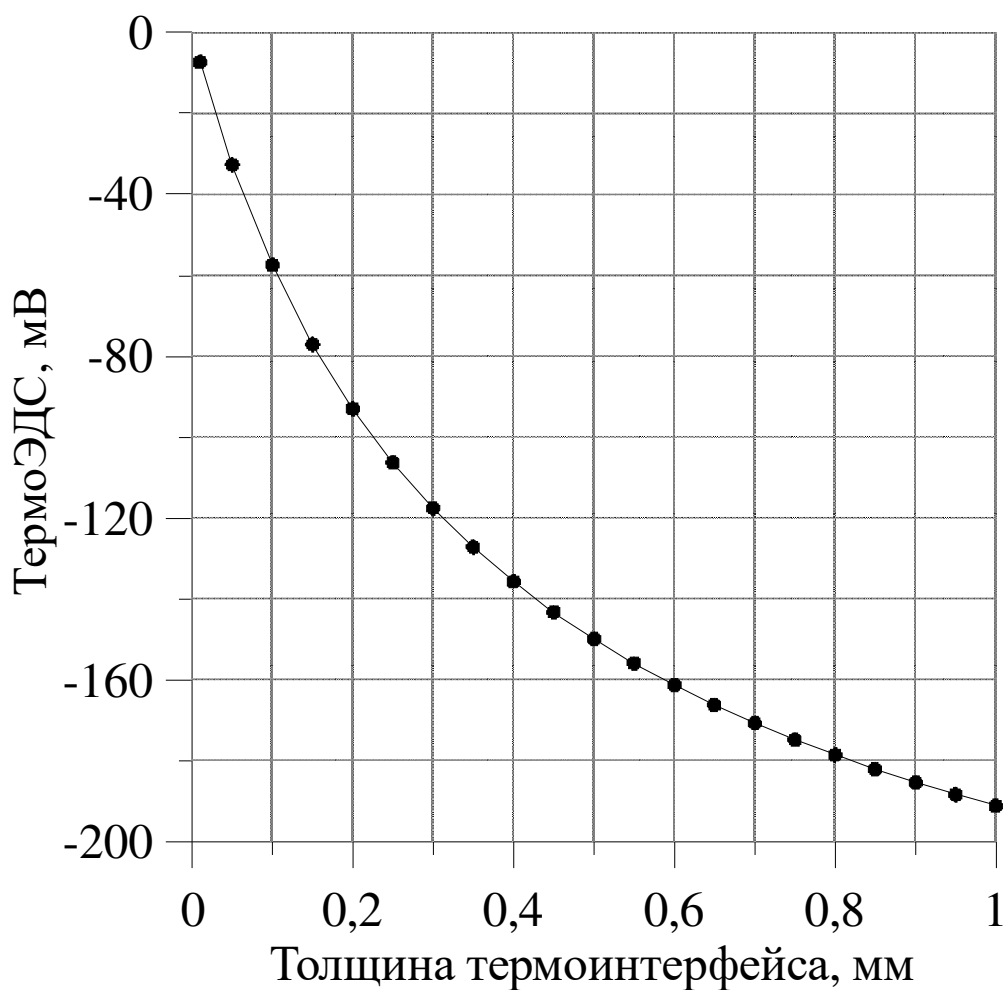


Рисунок 33. График зависимости максимально возникающей термоЭДС при изменении толщины слоя термоинтерфейса от 0,01 до 1 мм

Результаты исследования зависимости максимально возникающей термоЭДС (в переходном режиме) от изменения толщины слоя термоинтерфейса для случая, когда толщина термоинтерфейса изменяется в пределах от 0,05 мм до 0,10 мм приведены на рисунке 34. Данный график показывает практически линейную зависимость термоЭДС от изменения толщины теплопроводящего слоя в пределах от 0,05 мм до 0,1 мм. Это говорит о возможности использования информации о величине термоЭДС в переходном режиме для определения толщины термоинтерфейса при известной корреляционной зависимости, например для случая 50, 75 и 100 % площади покрытия корпуса силового элемента термоинтерфейсом

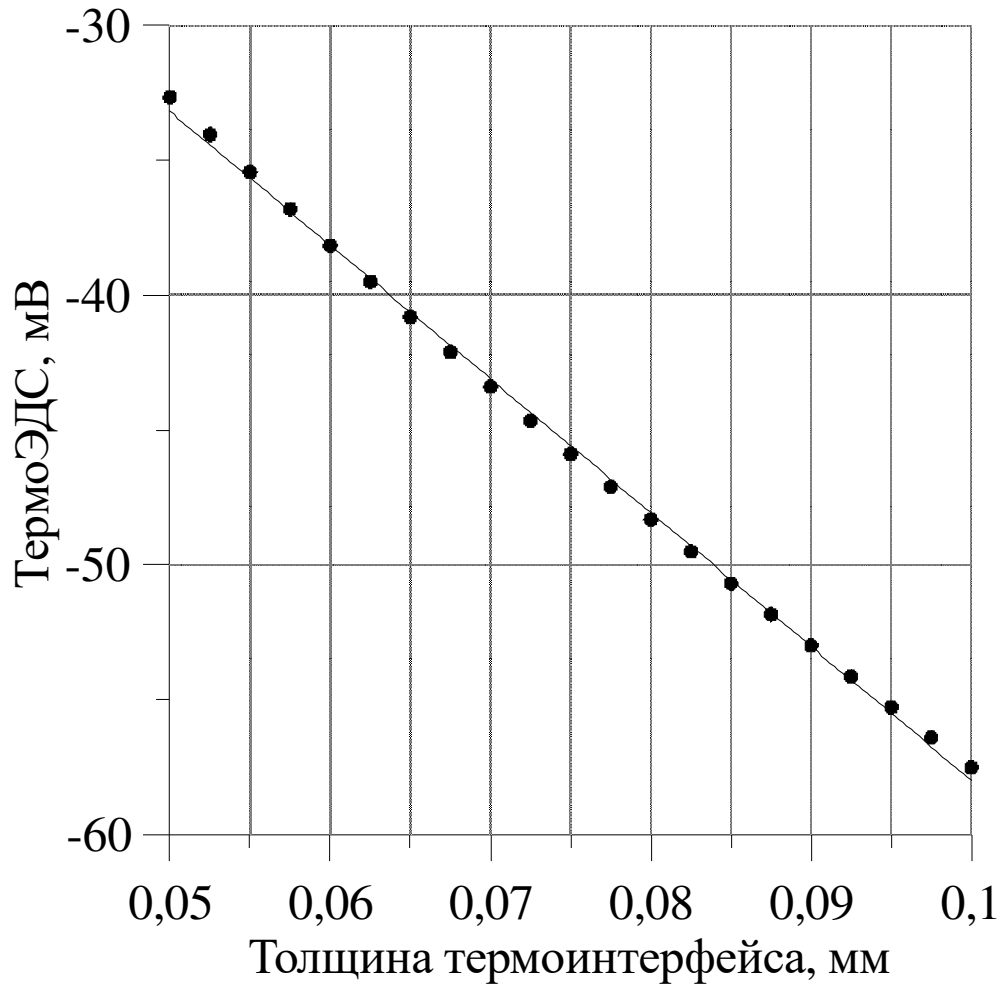


Рисунок 34. График зависимости термоЭДС в переходном режиме от толщины термоинтерфейса

Помимо информации о максимально возникающем уровне термоЭДС при переходном процессе, можно использовать информацию о величине термоЭДС после завершения переходного процесса.

На рисунке 35 приведен график зависимости установившегося значения термоЭДС от толщины слоя термоинтерфейса.

Данный график показывает практически линейную зависимость установившегося значения термоЭДС от изменения толщины теплопроводящего слоя в пределах от 0,01 мм до 1 мм. Это можно использовать для определения теплофизических параметров термоинтерфейса для случаев с относительно высоким тепловым сопротивлением. Однако относительно низкий уровень термоЭДС в установившемся режиме делает предпочтительным использование термоЭДС в переходном режиме.

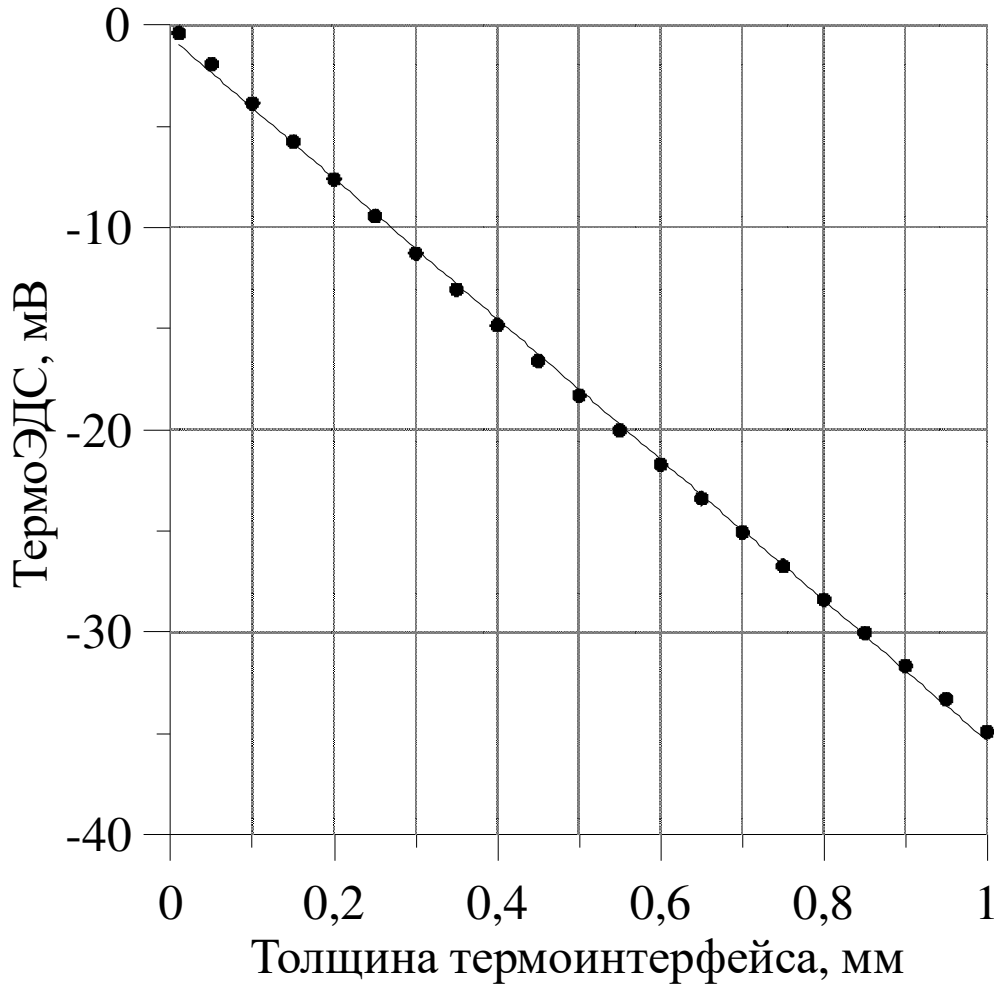


Рисунок 35. График зависимости установившегося значения термоЭДС при изменении толщины слоя термоинтерфейса от 0,01 мм до 1 мм

Исследуем случай для тех же материалов цилиндров, толщине слоя термоинтерфейса – 0,1 мм и размерах нижнего цилиндра 5, 7 и 12 см. Результаты исследования представлены на рисунке 36.

Из полученного графика видно, что увеличение длины нижнего цилиндра приводит к снижению максимального значения термоЭДС, но при этом форма импульса становится более полой. Из-за увеличения теплоемкости цилиндра он дольше набирает температуру до уровня нагрева, и разность температур, вызывающая термоЭДС становится ниже. Это говорит о том, что дальнейшее увеличение теплоемкости исследуемого объекта может привести к невозможности применения данного метода из-за низкого уровня термоЭДС.

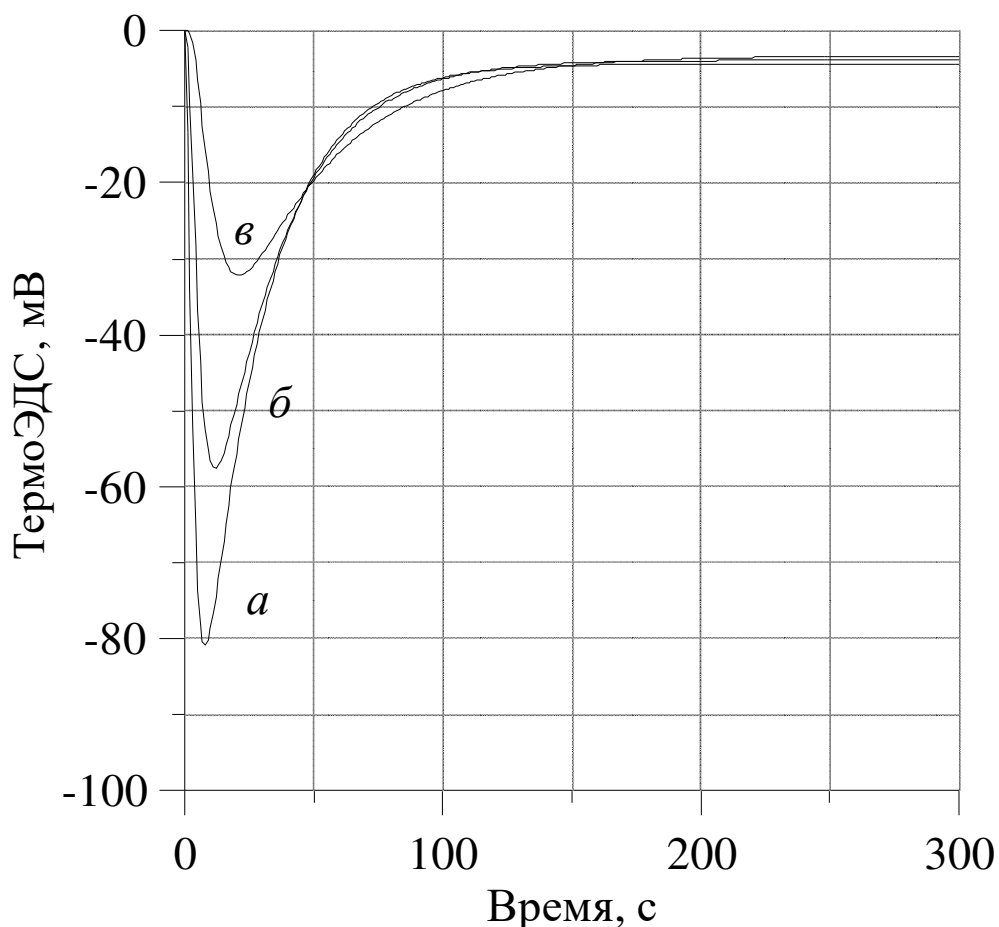


Рисунок 36. ТермоЭДС между телами из алюминия и меди при толщине термоинтерфейса 0,1 мм и длине нижнего цилиндра: а) 5 мм; б) 7 мм; в) 12 мм

Исследуем случай для тех же материалов цилиндров, толщине слоя термоинтерфейса – 0,1 мм и размерах верхнего цилиндра 2, 3 и 4 см. Результаты исследования представлены на рисунке 37.

Рисунок 37 показывает, что увеличение длины верхнего цилиндра приводит к увеличению максимального значения термоЭДС и длительности переходного процесса. Из-за увеличения теплоемкости цилиндра он дольше набирает температуру до уровня нагрева, и разность температур, вызывающая термоЭДС становится выше.

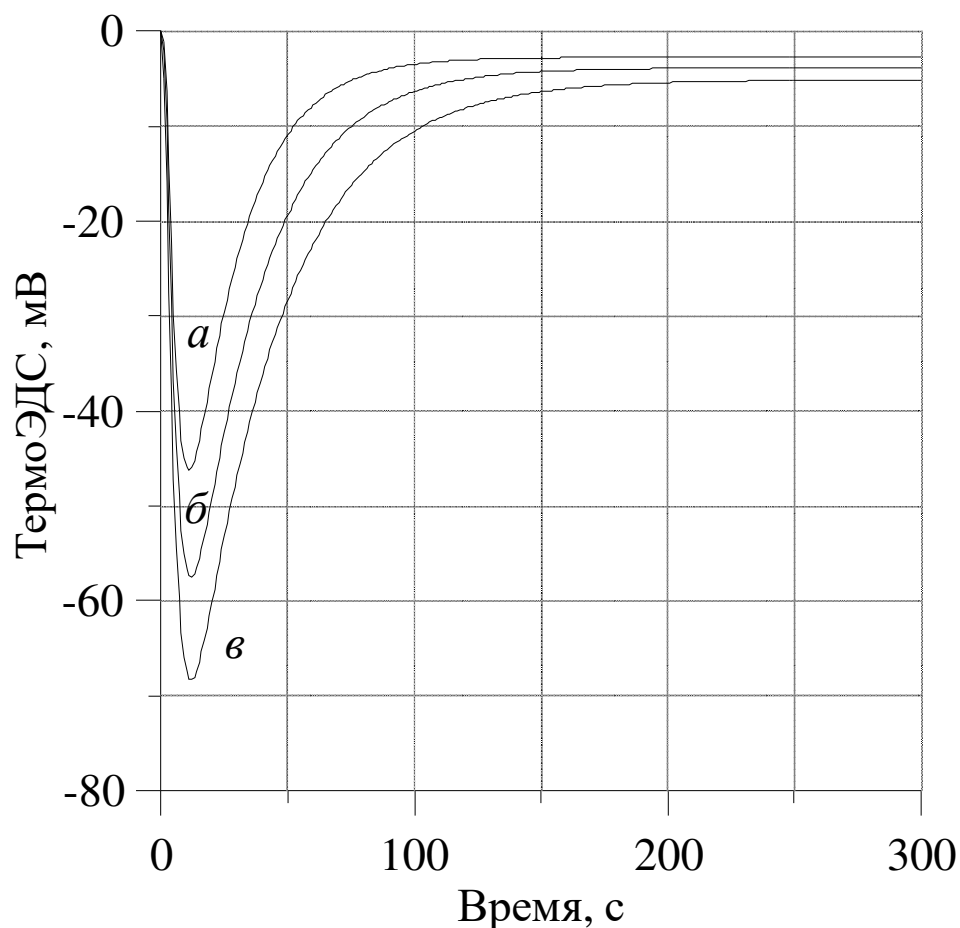


Рисунок 37. ТермоЭДС между телами из алюминия и меди при толщине термоинтерфейса 0,1 мм и длиной верхнего цилиндра: а) 2 мм; б) 3 мм; в) 4 мм

Исследуем другой случай: материал нижнего цилиндра – алюминий, высота $L_1=7$ см; материал верхнего цилиндра – медь, покрытая никелем, высота $L_1=3$ см. Радиус обоих цилиндров равен 1 см. Изменяя толщину теплопроводящего слоя в пределах от 0,02 до 0,5 мм, получим значение возникающей термоЭДС для каждого случая. Результаты исследования представлены на рисунке 38. Вначале наблюдается резкое увеличение термоЭДС за счет быстрого нагрева нижнего цилиндра и медленного нагрева верхнего из-за конечного времени передачи тепла по цилиндру и наличия теплового сопротивления термоинтерфейса, расположенного в зазоре между цилиндрами. Достигнув максимума, термоЭДС начинает плавно уменьшаться, что связано с полным прогревом нижнего цилиндра и его температура больше не увеличивается, в то же время температура верхнего цилиндра продолжает увеличиваться. В момент достижения теплового равновесия переходной процесс завершается и термоЭДС перестает изменяться.

Следует отметить, что при уменьшении теплового сопротивления термоинтерфейса, наблюдается снижение возникающей термоЭДС из-за уменьшения разницы температур на границе слоя термоинтерфейса. Это вызвано снижением теплового сопротивления, как и в случае, представленном на рисунке 32. Однако, в данном случае, возникающая термоЭДС имеет положительную полярность, что вызвано отрицательным значением коэффициента Зеебека никеля.

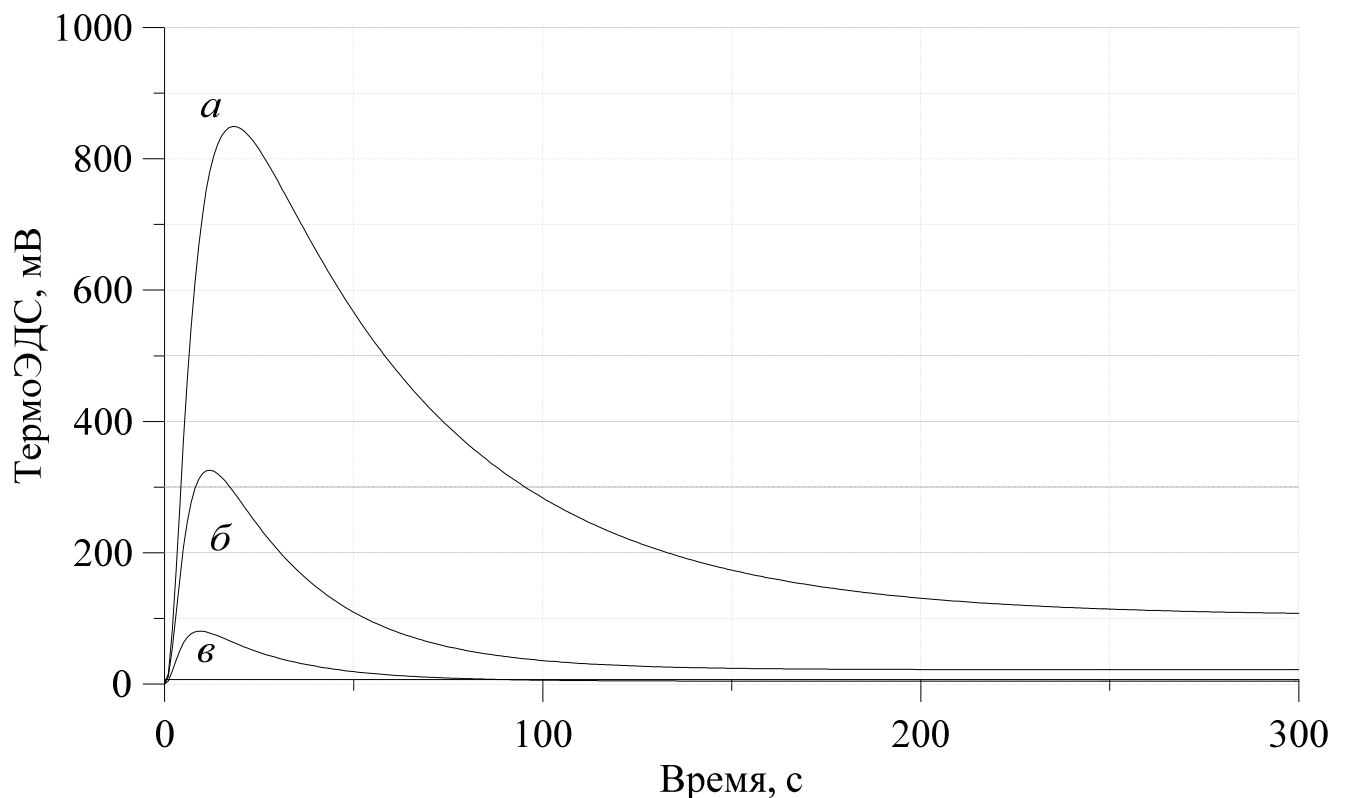


Рисунок 38. ТермоЭДС между цилиндрами из меди и меди с никелированным покрытием при толщине термоинтерфейса: а) 0,5 мм; б) 0,1 мм; в) 0,02 мм.

Значение термоЭДС значительно выше, по сравнению с аналогичным случаем (рисунок 32) из-за высокого коэффициента Зеебека никеля, которым покрыт второй цилиндр. Время установления осталось прежним, т.к. параметры цилиндров (теплоемкость и теплопроводность) не изменились. Постоянная составляющая термоЭДС по завершению переходного процесса так же

увеличилась из-за влияния коэффициента Зеебека никеля, которым покрыт второй цилиндр.

Исследуем влияние покрытия верхнего цилиндра на величину термоЭДС: толщина слоя термоинтерфейса – 0,1 мм, нижний цилиндр состоит из алюминия, а верхний цилиндр состоит из меди и покрыт оловом, серебром, золотом, никелем. Результаты исследования термоЭДС приведены на рисунке 39.

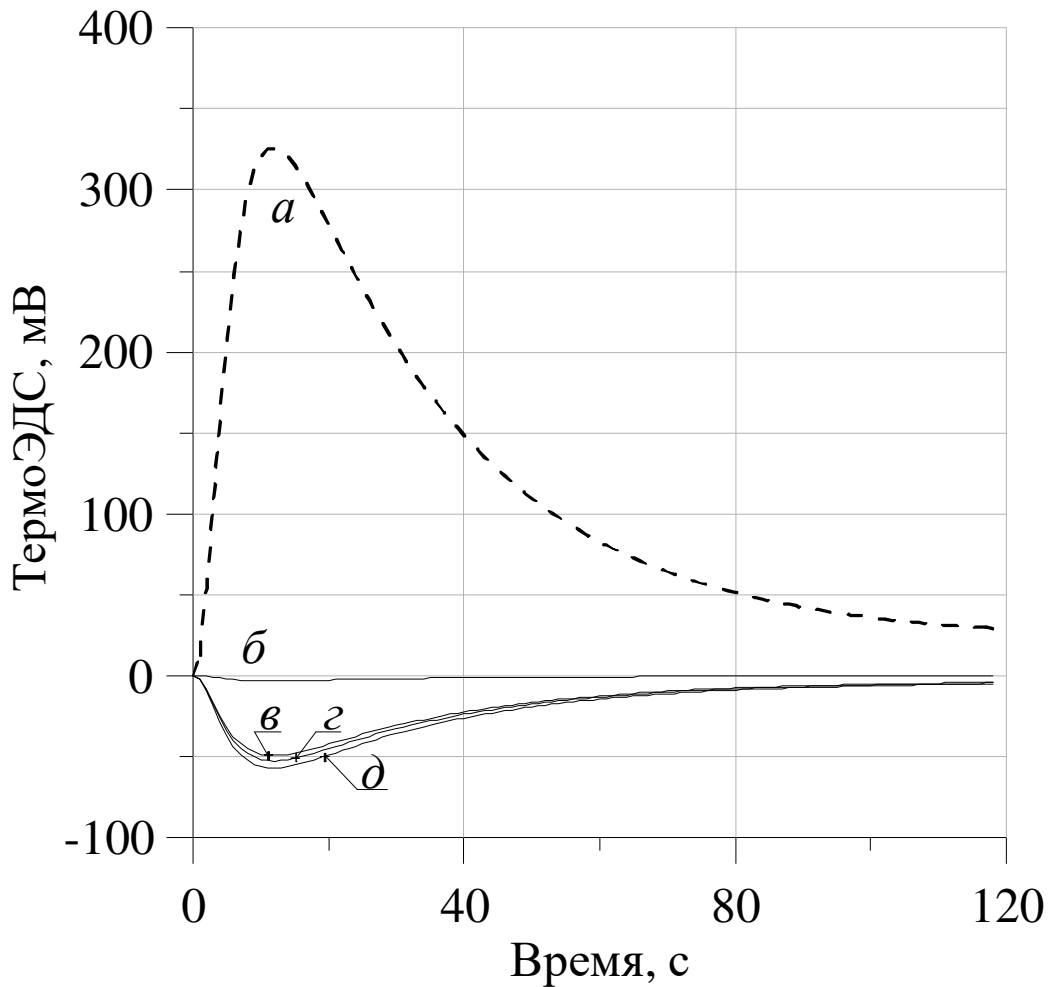


Рисунок 39. ТермоЭДС при толщине термоинтерфейса 0,1 мм между нижним цилиндром из алюминия и верхним цилиндром из меди с покрытием из: а) никеля, б) олова, в) серебра, г) золота, д) без покрытия.

Из рисунка 39 видно, что по отношению к меди самая большая термоЭДС у никеля. Это вызвано его большим, по отношению к остальным материалам, значением коэффициента Зеебека. Покрытие из олова относительно меди дает самое малое значение термоЭДС из-за его малого коэффициента Зеебека, в

данном случае, максимальное значение составило – 3,2 мВ. Остальные покрытия дают схожие результаты из-за схожего значения коэффициента Зеебека.

Рассмотрим данный случай для нижнего цилиндра, изготовленного из меди (рисунок 40).

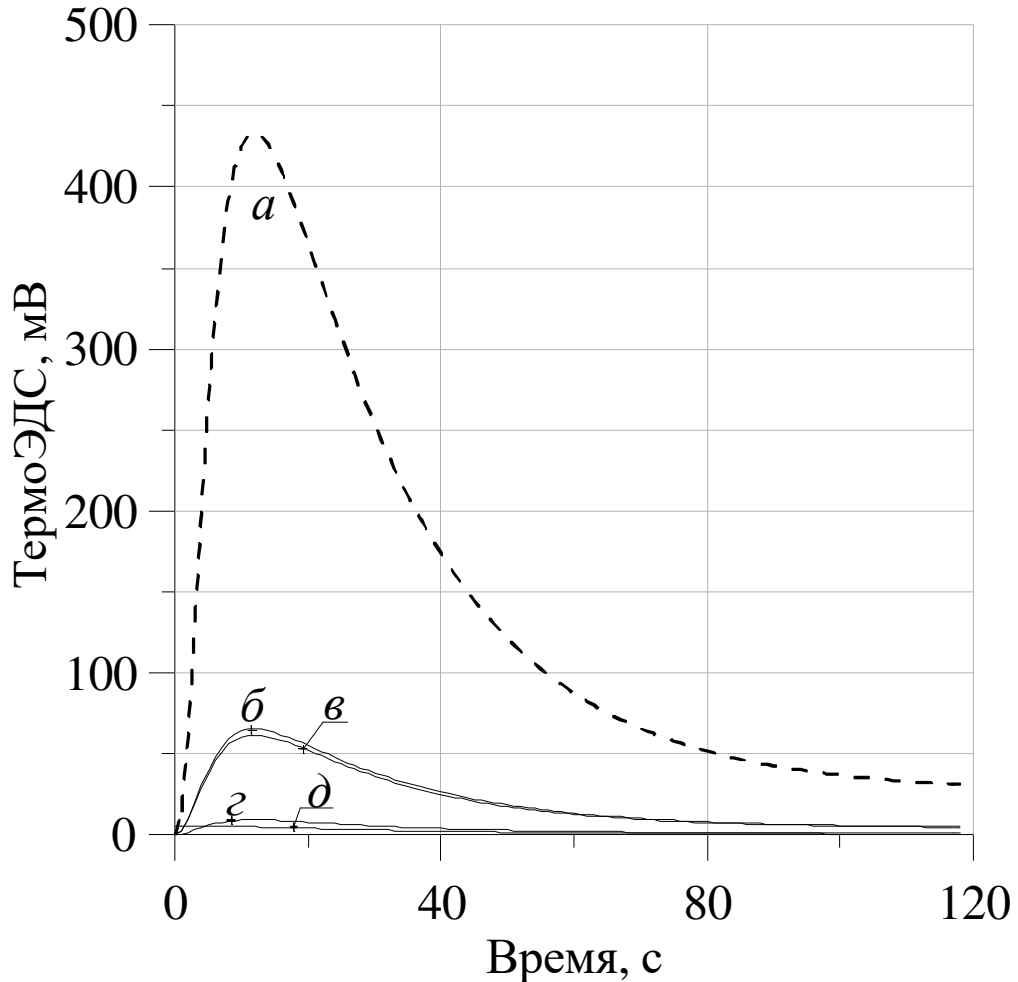


Рисунок 40. ТермоЭДС при толщине термоинтерфейса 0,1 мм между нижним цилиндром из алюминия и верхним цилиндром из меди с покрытием из: а) никеля, б) без покрытия, в) олова, г) серебра, д) золота.

Из рисунка 40 видно, что по отношению к меди самое большое значение термоЭДС у покрытия из никеля. Это вызвано его большим, по отношению к остальным материалам, значением коэффициента Зеебека. Покрытия из серебра и золота относительно алюминия дают самое малое значение термоЭДС из-за компенсации коэффициентов Зеебека при их сложении. В данном случае, значение термоЭДС для серебра составило –9 мВ, а для золота – 5,4 мВ.

Остальные покрытия дают схожие результаты из-за схожего значения коэффициента Зеебека.

Следует отметить, что чувствительность выше во втором варианте, когда покрытие имеет нижний цилиндр. Это обусловлено более высокой температурой нижнего цилиндра и, соответственно из-за высокого значения коэффициента Зеебека у покрытия, термоЭДС нижнего цилиндра будет больше.

ВЫВОДЫ

Влияние теплового сопротивления термоинтерфейса на термоЭДС, возникающую между корпусом прибора и радиатора позволяет сделать следующие выводы:

1. Изменение термоЭДС при заданном тепловом сопротивлении термоинтерфейса зависит от материалов корпуса прибора и радиатора, а так же от толщины слоя термоинтерфейса и его теплопроводности.

2. Длительность переходного процесса термоЭДС зависит от теплоемкости радиатора, прибора и теплопроводности материалов, из которых они изготовлены.

3. Максимальное значение возникающей термоЭДС напрямую зависит, помимо теплоемкостей прибора и радиатора и теплопроводности их материалов, от теплового сопротивления термоинтерфейса. Зависимость максимального значения термоЭДС от теплового сопротивления термоинтерфейса имеет нелинейный характер, однако для частного случая этот характер можно считать линейным.

Практической реализации проведенных теоретических исследований посвящен следующий раздел диссертации

ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМОИНТЕРФЕЙСА НА ТЕРМОЭДС

3.1. Экспериментальная установка для исследования теплового сопротивления лабораторных образцов

Для исследования теплового сопротивления с помощью термоЭДС были проведены экспериментальные исследования. В качестве объекта исследования использовались схожие с математической моделью элементы. На скреплённые друг с другом цилиндры из алюминия, длиной 19,5 и 0,5 см, и одинаковыми радиусами величиной 25 мм, были запрессованы платинородий-платинородиевые термопары таким образом, что бы они были как можно ближе расположены к границе соединения цилиндров. Усилие затяжки винта определялось срабатыванием шайбы Гровера М4 [19]. Рядом с ними были так же запрессованы медные измерительные электроды. Использование медных электродов позволит с помощью возникающей термоЭДС определить разницу температур используя справочные значения коэффициента Зеебека при отсутствии градуировочной таблицы для данного типа получившейся термопары.

Для контроля разницы температур использовался дифференциальный метод измерения температуры, что исключает необходимость использовать в качестве точки отсчета температуру 0 С. Так же этот метод позволяет для определения разницы температур использовать только один измеритель температуры, вместо двух, что исключает влияние погрешностей измерительных приборов на результаты эксперимента.

Схема эксперимента приведена на рисунке 41.

При экспериментальном исследовании цилиндр погружали на 10 см в кипящую воду и наблюдали распространение тепла от одного цилиндра к другому, а также изменение температуры во времени на границе термоинтерфейса термопарами, одновременно фиксируя значение

дифференциальной термоЭДС, возникающей между алюминиевыми образцами и медными проводниками. В качестве измерителя температуры и измерителя термоЭДС использовался мультиметр Agilent 34461А. Данный измерительный прибор обладает высокой точностью измерения напряжения, низкой погрешностью и возможностью передачи данных на персональный компьютер по интерфейсу Ethernet [54].

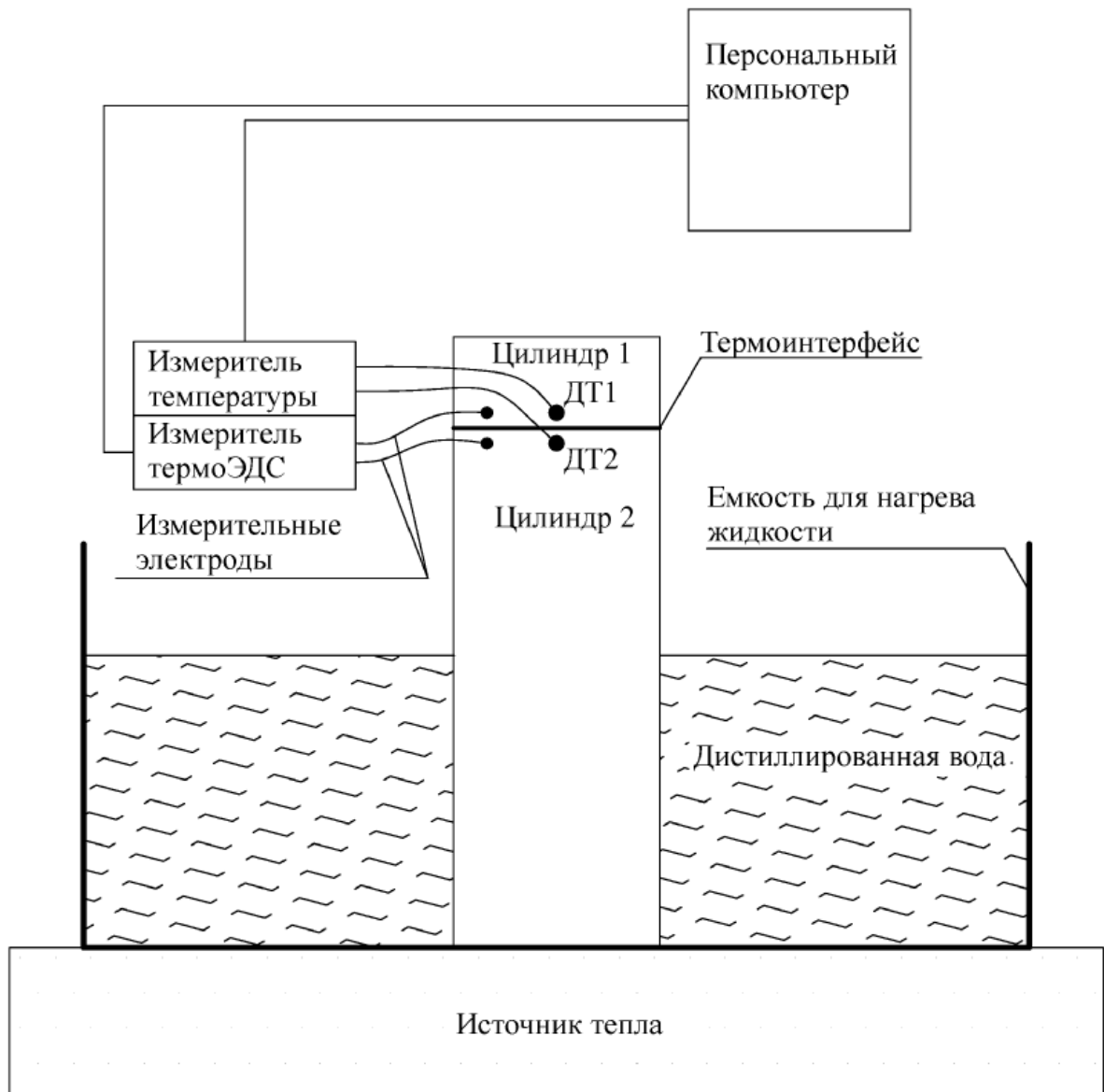


Рисунок 41. Схема эксперимента

В качестве источника тепла использовалась лабораторная плитка ПЛ-01 с функцией стабилизации температуры, позволяющая вести нагрев до 300°C. При передаче теплоты в простейшем случае через однослойную плоскую стенку коэффициент теплопередачи вычисляется по формуле:

$$K = \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{h}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^{-1}, \quad (53)$$

а для тела, состоящего из n слоев разных материалов, по формуле [9]:

$$K = \left(\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^{-1}. \quad (54)$$

где h – толщина термоинтерфейса; α_1 и α_2 – коэффициенты теплоотдачи от радиатора к термоинтерфейсу и от термоинтерфейса к корпусу полупроводникового прибора соответственно.

Таким образом, с учетом формулы (53) тепловое сопротивление однородного тела, рассчитанное по формуле (14), будет представлено как

$$R_S = E \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{h}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right) / \alpha S. \quad (55)$$

Тепловое сопротивление нескольких соединенных тел с разной теплопроводностью с учетом формулы (54) определяется как:

$$R_S = E \left(\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2} \right) / \alpha S. \quad (56)$$

Исходя из формул (55) и (56), тепловое сопротивление термоинтерфейса в промежутке между полупроводниковым прибором и радиатором охлаждения определяется по разнице температур на границах термоинтерфейса,

Полученные данные приведены на рисунках 42 и 43. Здесь и далее для удобства отображения, график термоЭДС переведен в положительную ось координат. Доверительный интервал не превышает 8%.

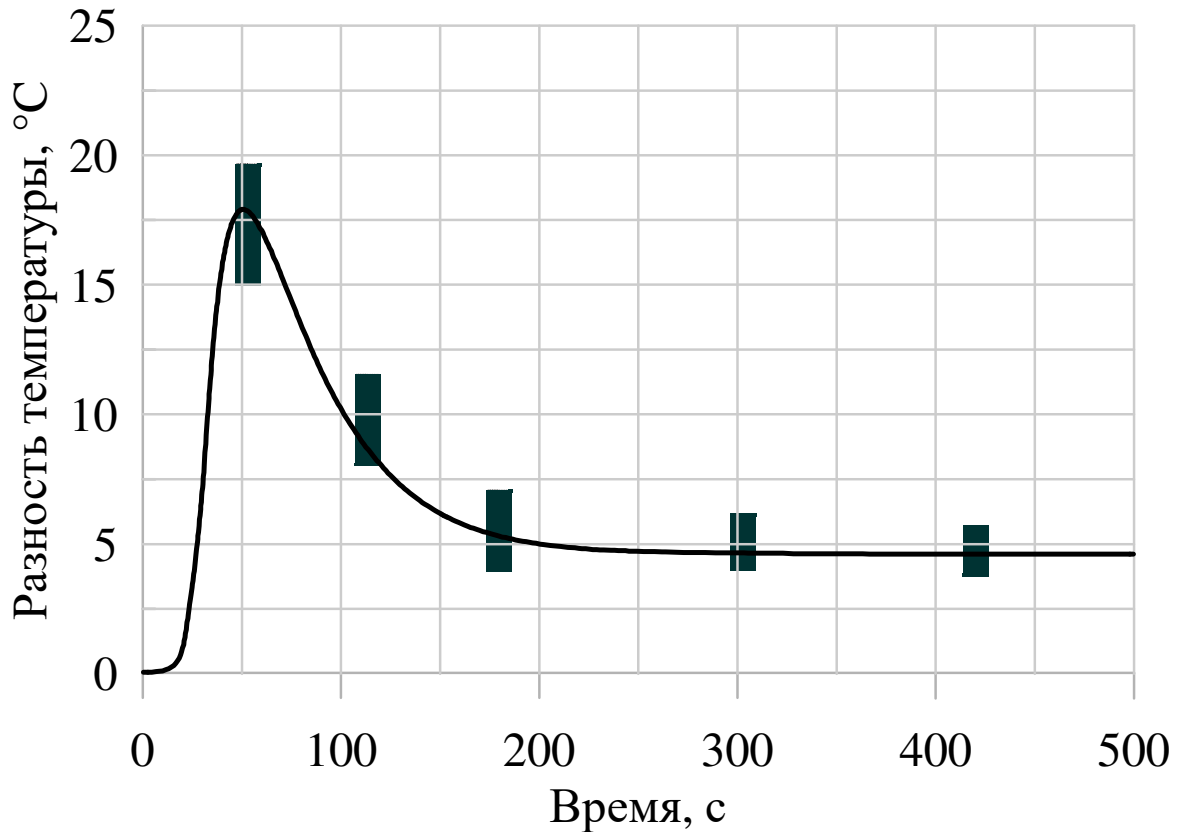


Рисунок 42. График зависимости разности температур на границе термоинтерфейса от времени

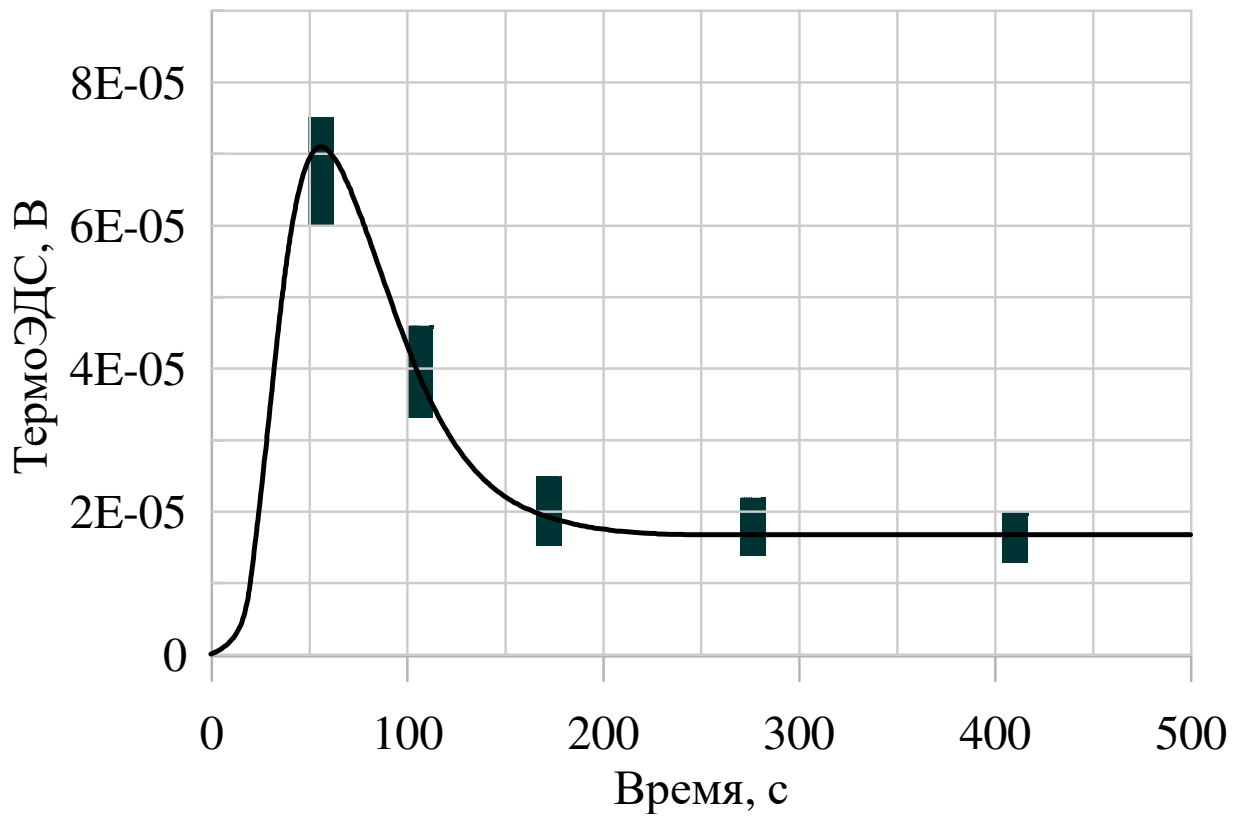


Рисунок 43. График зависимости термоЭДС от времени

Согласно [55], результирующая термоЭДС, возникающая между разнородными металлами, а в нашем случае между алюминием и медью описывается как:

$$E_{рез} = (\alpha_{Cu} - \alpha_{Al}) \times \Delta T \quad (57)$$

где α_{Cu} и α_{Al} – коэффициенты Зеебека меди и алюминия соответственно.

Согласно (57) в нашем случае:

$$E_{Cu_Al} = (3,2 - (-0,4)) \times 10^{-6} \times \Delta T \quad (58)$$

Пересчитанное значение разницы температуры из термоЭДС и сравнение его со значением разницы температуры, измеренное термопарами, приведено на рисунке 44.

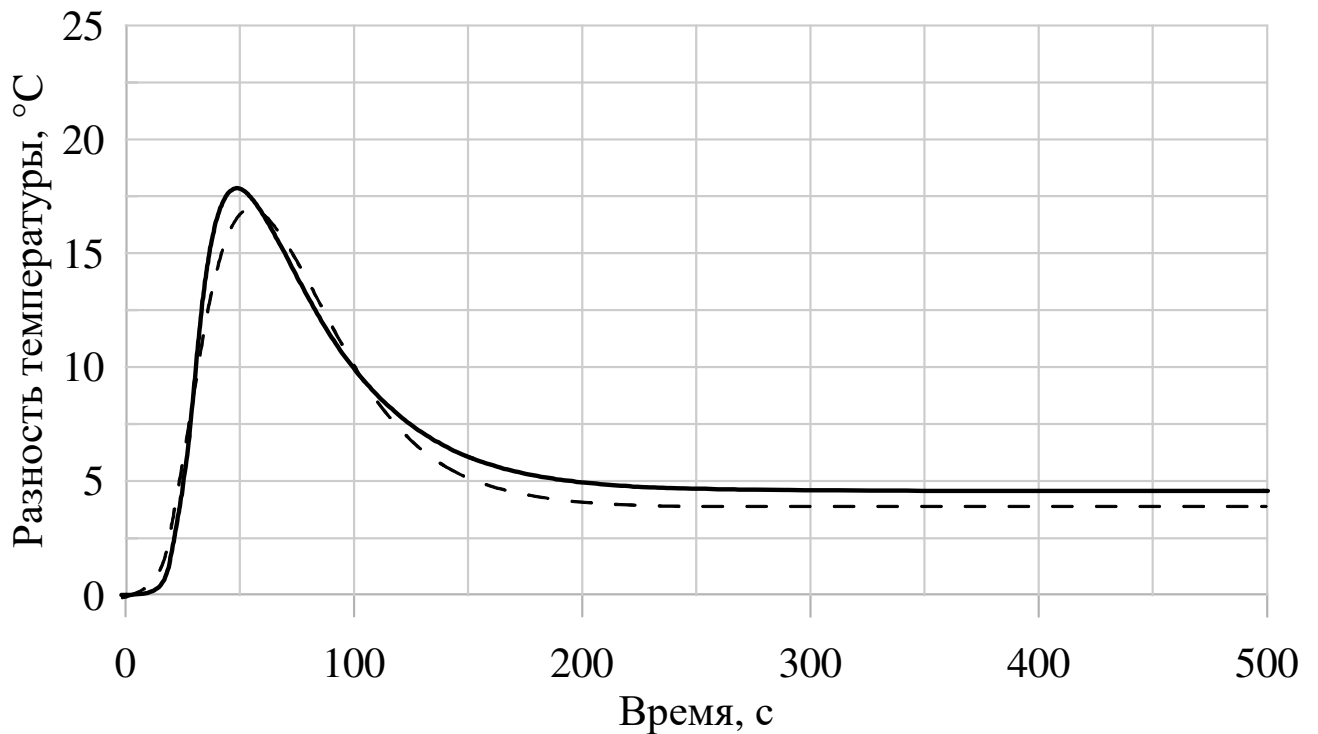


Рисунок 44 График зависимости разности температур в точках С и Е от времени. (сплошная линия – измеренная термопарами, пунктирная линия – измеренная с помощью термоЭДС)

Полученный рисунок наглядно показывает, что разница температуры, вызванная высоким тепловым сопротивлением термоинтерфейса, даже в установившемся режиме превышает потери тепла в окружающую среду.

Для исследования теплового сопротивления по формуле (17) приведём тепловую модель к аналогу в виде электрической цепи методом электротепловой аналогии [33, 40] (рисунок 45).

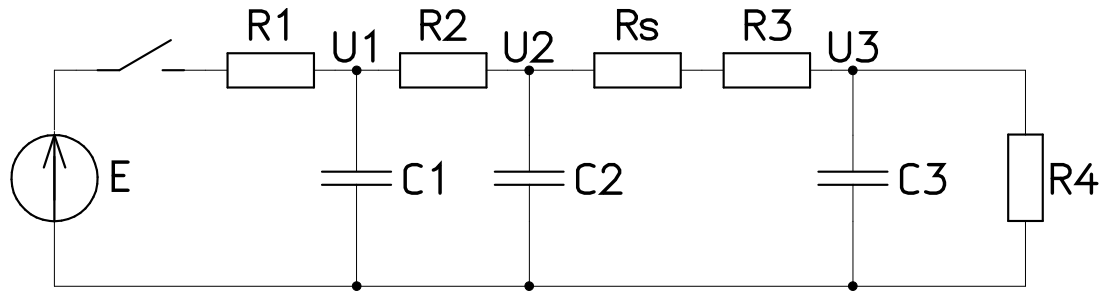


Рисунок 45. Электрический аналог тепловой схемы

В электрическом аналоге тепловой модели приняты следующие обозначения:

Источник питания E – источник тепла в виде кипящей воды;

R_1 – тепловое сопротивление погруженной в воду части цилиндра;

R_2 – тепловое сопротивление части цилиндра от кромки воды, до границы термоинтерфейса;

R_s – тепловое сопротивление термоинтерфейса

R_3 – тепловое сопротивление верхнего цилиндра;

R_4 – тепловое сопротивление окружающей среды.

C_1 – теплоемкость погруженной в воду части цилиндра;

C_2 – теплоемкость части цилиндра от кромки воды, до границы термоинтерфейса;

C_3 – теплоемкости верхнего цилиндра;

E – температура кипящей воды;

U_1 – температура нижнего цилиндра у кромки воды;

U_2 и U_3 – температуры в точках измерения.

Согласно электрическому аналогу цепи, приведённой на рисунке 45, ток резистора R_S , эквивалентный тепловому потоку, будет определяться из выражения:

$$I_{RS} = \frac{U1 - U2}{R1}, \quad (59)$$

следовательно, зная тепловые сопротивления $R2$ и $R3$ можно найти тепловое сопротивление R_S :

$$R_S = \frac{U2 - U3}{I_{RS}} - I_{RS} \times R2 - I_{RS} \times R3 \quad (60)$$

Результаты расчета теплового сопротивления R_S , по формуле(60) с использованием экспериментальных данных, приведены на рисунке 46. Полученные значения теплового сопротивления получены с использованием усреднения 50 измерений методом линейной фильтрации.

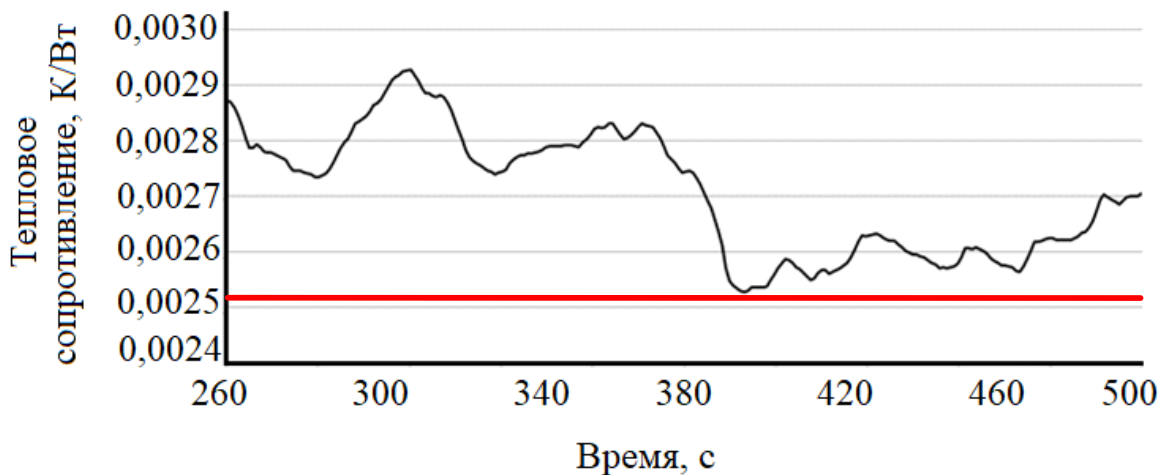


Рисунок 46. Экспериментальные исследования теплового сопротивления термоинтерфейса в установившемся режиме

Вариации теплового сопротивления характеризуются случайной погрешностью, вызванной флуктуациями температуры в процессе эксперимента. Измеренное среднее значение теплового сопротивления термоинтерфейса составляет $(0,002721 \pm 0,0002)$ К/Вт, что отличается от расчетного значения $0,0025429$ К/Вт [67] на 7%.

3.2. Экспериментальные исследования зависимости термоЭДС от теплового сопротивления

Для исследования зависимости термоЭДС от теплового сопротивления проведён эксперимент, заключающийся в измерении термоЭДС между алюминиевым цилиндром и закреплённым на него корпусом ТО-220. Корпус ТО-220 широко распространён в производстве полупроводниковой силовой техники. Материал корпуса – медь, материал покрытия корпуса – олово.

Для проведения эксперимента была спроектирована установка для определения теплового сопротивления термоинтерфейса, схема которой приведена на рисунке 47.

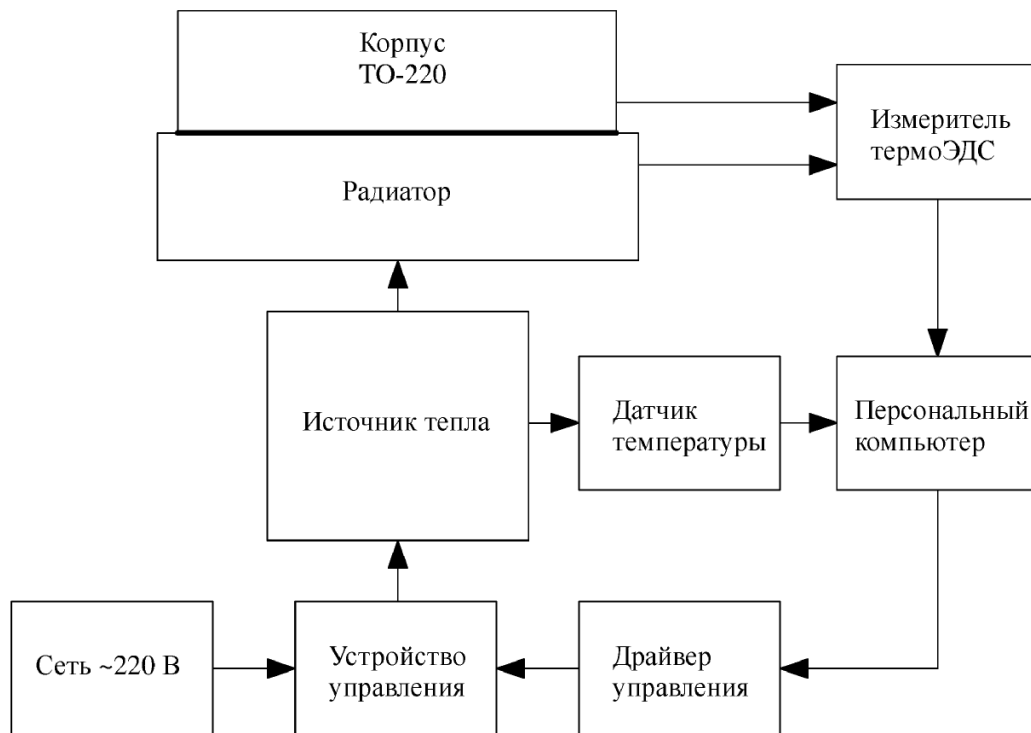


Рисунок 47. Схема экспериментальной установки

Принцип работы установки заключается в следующем. Пользователь подает на персональный компьютер в специально разработанном программном обеспечении команду на начало работы. Персональный компьютер принимает сигнал с датчика управления и подаёт сигнал на работу драйвера управления источником тепла до тех пор, пока значение датчика температуры не будет

соответствовать нужной температуре, в данном случае – 70 °С, после чего оповещает пользователя о готовности источника тепла.

Драйвер управления подаёт на устройство управления импульсы напряжения по алгоритму широтно-импульсной модуляции на устройство управления, которое питается от сети 220 В и подаёт в свою очередь импульсы на источник тепла.

Измеритель термоЭДС непрерывно передаёт данные о значении термоЭДС на персональный компьютер.

Пользователь обеспечивает контакт источника тепла и радиатора охлаждения до тех пор, пока данные измерителя термоЭДС, переданные на персональный компьютер не перестанут изменяться, что говорит о том, что достигнуто температурное равновесие.

После достижения теплового равновесия, программное обеспечение продолжает измерение в течении 10 секунд. Если значение термоЭДС не изменяется в течение этого времени, то программа выдаёт сигнал об окончании работы, и перестаёт подавать импульсы управления на драйвер.

Полученные данные сохраняются и обрабатываются в персональном компьютере, и выводятся на экран монитора.

Для дополнительного контроля разницы температур на корпус ТО-220 и на радиатор через теплопроводящий клей были прикреплены платинородий-платинородиевые термопары ДТ1 и ДТ2 фирмы «Элемер», включенные по дифференциальной схеме. Подключение осуществлялось таким образом, чтобы расстояние от термопары до границы соприкосновения корпуса и радиатора было минимальным [77, 81]. Таким образом, схема экспериментальной установки принимает вид, представленный на рисунке 48.

В качестве измерителей температуры и термоЭДС использовался прибор Agilent 34461A [54].

В качестве драйвера управления использовался контроллер 1156EУ2АТ [45] в связке с микросхемой 1308EУ3 [46].

В качестве устройства управления использовался транзистор 2П767В2 [71].

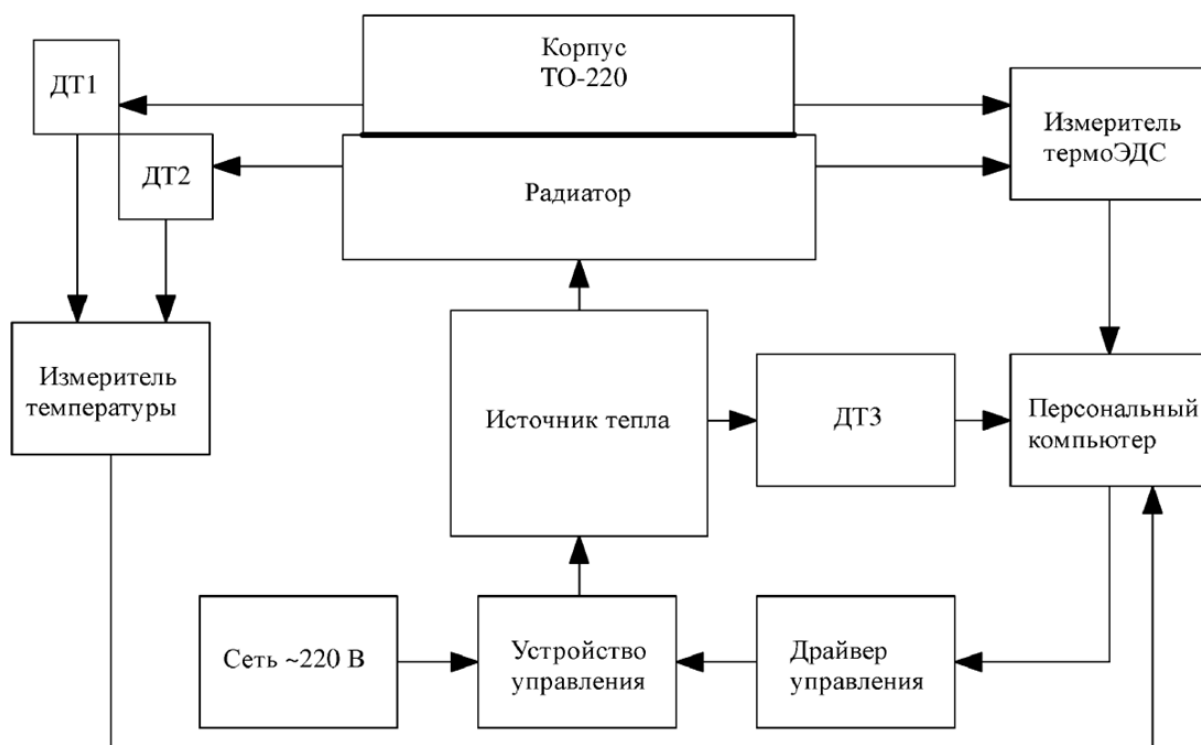


Рисунок 48. Схема экспериментальной установки с установкой дополнительных датчиков температуры

Стоит учитывать, что при контроле термоЭДС измеряется разница потенциалов между двумя разнородными проводниками друг относительно друга, а не относительно температуры 0 С. Результирующая термоЭДС согласно правилу аддитивности [12, 79] определяется путем суммирования всех термоЭДС, входящих в контур измерения. При соединении проводника (например, пайкой) с радиатором и с корпусом полупроводникового прибора в контактной точке между припоем и проводником также возникнет термоЭДС [68]. В то же время необходимо учитывать направление термоЭДС, возникающей между металлами, образующими замкнутый контур измерения (рисунок 49).

Разница температур, характеризующая тепловое сопротивление, при нанесении теплопроводящей пасты КПТ-8, частичном ее нанесении и ее отсутствии, полученная с помощью термопар и с помощью пересчета термоЭДС, показана на рисунках 50 и 51. При этом учитывалось, что покрытие подложки корпуса силового элемента выполнено из олова, а радиатор – из алюминия.

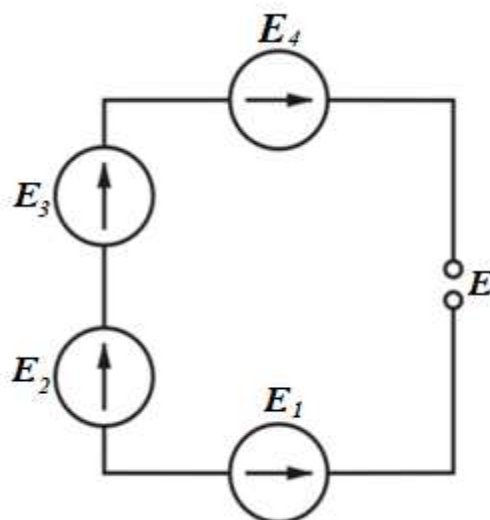


Рисунок 49. Эквивалентная схема измерения термоЭДС разнородными проводниками

Результирующая термоЭДС в таком случае рассчитывается по формуле

$$E_{\text{рез}} = \sum_i E_i.$$

Для частичного нанесения теплопроводящей пасты КПТ-8 использовали предварительно закрепленную на поверхности корпуса силового прибора полиэтиленовую пленку, которая препятствовала попаданию пасты на закрытую часть корпуса. Были приготовлены заготовки из пленки трех размеров, которые закрывали 25, 50 и 75 % поверхности корпуса силового прибора. При построении графиков использовалось усреднение из десяти измерений методом линейной фильтрации [60]. Доверительный интервал не превышает 6 %.

Зависимости разницы температур корпуса и радиатора, полученные с помощью термопар и полученные с помощью пересчета термоЭДС приведены на рисунках 50 и 51.

В начальный момент времени разница температур между корпусом силового элемента и радиатором охлаждения увеличивается для каждого варианта нанесения термоинтерфейса за счет быстрого прогрева радиатора, помещенного в кипящую воду, и медленного нагрева корпуса силового элемента.

После полного прогрева радиатора начинается плавный нагрев корпуса силового элемента, и разница температур начинает плавно уменьшаться, достигая установившегося значения.

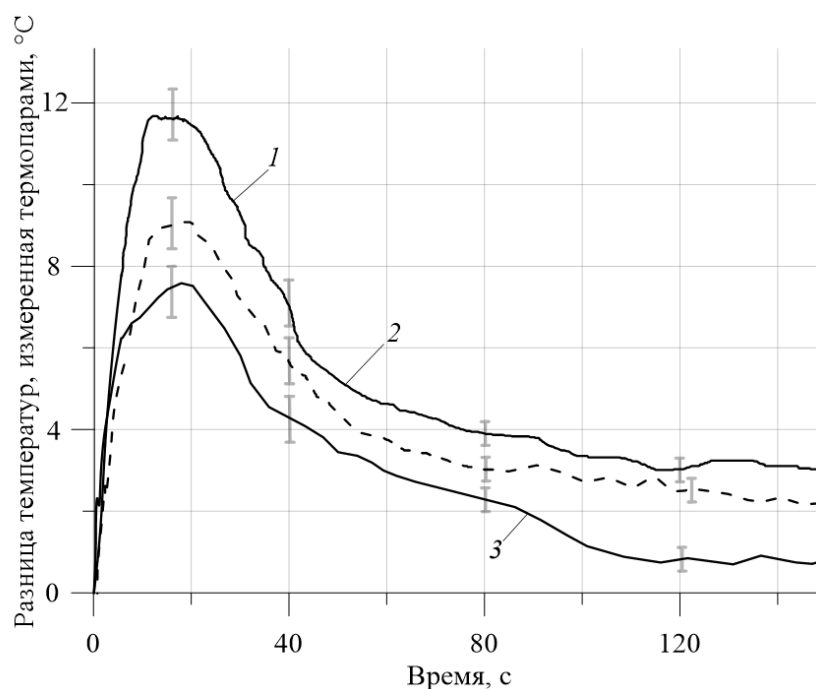


Рисунок 50. Зависимости разницы температур корпуса и радиатора, полученные с помощью термопар: 1 – без термоинтерфейса; 2 – с термоинтерфейсом, покрывающим 50 % площади корпуса силового элемента; 3 — с термоинтерфейсом, покрывающим 100 % площади корпуса силового элемента

Длительность переходного процесса для каждого случая нанесения термоинтерфейса постоянна, так как эта величина характеризуется теплоемкостью радиатора и корпуса прибора, а влияние теплового сопротивления теплопроводящего слоя крайне мало. Колебательный характер изменения разницы температур, показанный на рисунке 50, вызван небольшими флуктуациями температуры окружающей среды и наличием неконтролируемых воздушных потоков в зоне эксперимента, которые оказывают влияние в основном на холодный спай термопар [34]. Эти флуктуации наблюдаются и на рисунке 51, однако здесь они выражены менее сильно за счет большой тепловой инерции корпуса силового элемента. Анализ результатов экспериментов показывает, что графики температур, измеренных с помощью термопар и пересчета термоЭДС, отличаются не больше, чем на 8,25 %.

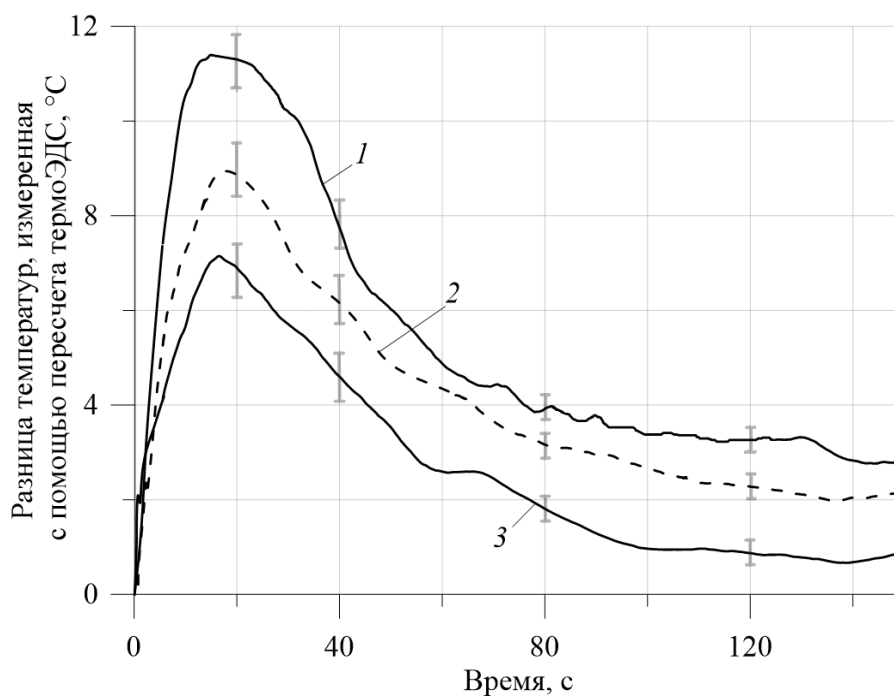


Рисунок 51. Зависимости разницы температур корпуса и радиатора, полученные с помощью пересчета термоЭДС корпуса и радиатора: 1 – без термоинтерфейса; с термоинтерфейсом, покрывающим 50 % площади корпуса силового элемента; 3 — с термоинтерфейсом, покрывающим 100 % площади корпуса силового элемента

Проведенные исследования выявили основной источник высокой погрешности контроля, заключающийся в примесях материалов исследуемых объектов, флуктуации температуры окружающей среды.

Результаты экспериментальных исследований зависимости термоЭДС от площади покрытия корпуса силового элемента теплопроводящим слоем показывают практически линейную зависимость: с увеличением площади покрытия термоЭДС линейно уменьшается (рисунок 52).

Доверительный интервал не превышает 6 %. Полученная линейная зависимость термоЭДС от площади покрытия корпуса силового элемента теплопроводящим слоем позволяет применять термоэлектрический метод для контроля качества нанесения теплопроводящего компаунда. При использовании радиаторов или силовых приборов в корпусах, изготовленных из разных материалов, необходимо предварительно определить градуировочную

зависимость термоЭДС от площади покрытия корпуса силового элемента теплопроводящим слоем [87]. Следует заметить, что термоэлектрический метод контроля можно использовать непосредственно в процессе эксплуатации электронного оборудования.

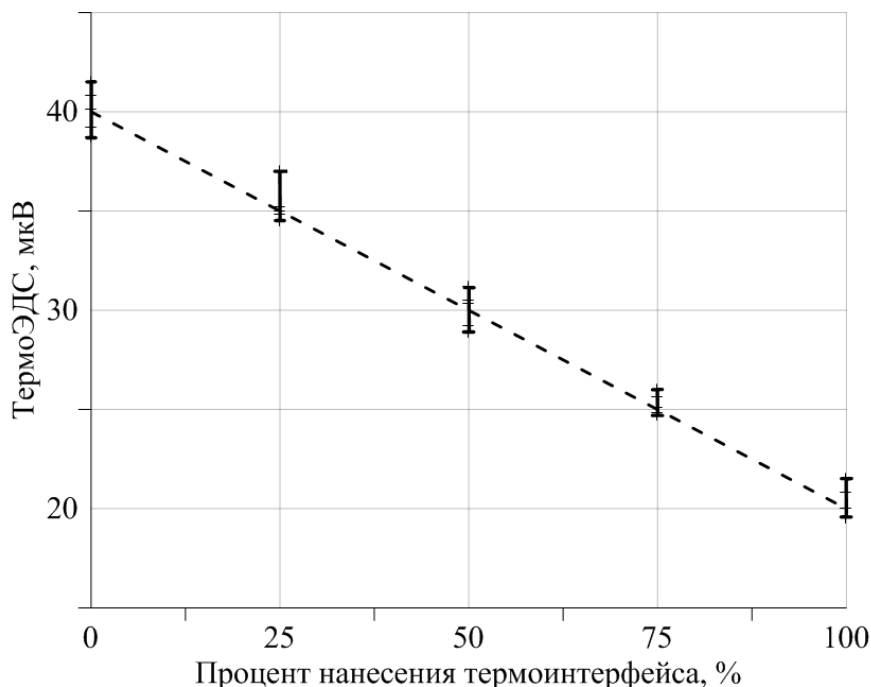


Рисунок 52. График зависимости термоЭДС от площади покрытия корпуса силового элемента теплопроводящим слоем

3.3. Экспериментальные исследования зависимости термоЭДС от площади покрытия процессора персонального компьютера термоинтерфейсом

Для экспериментального исследования зависимости возникающей термоЭДС от площади покрытия процессора персонального компьютера термоинтерфейсом проведён эксперимент, заключающийся в измерении возникающего термоЭДС между никелированной крышкой корпуса процессора персонального компьютера и установленного на него штатного радиатора охлаждения из алюминия, при различном количестве нанесенного термоинтерфейса.

Для измерения термоЭДС к корпусу процессора Intel Core Duo E4400 был припаян проводник таким образом, чтобы он не мешал правильной установке радиатора охлаждения, то есть проводник проходит не через сопрягаемые поверхности, а в стороне от них и не вносит дополнительное тепловое сопротивление (рисунок 53).



Рисунок 53. Проводник, припаянный к корпусу процессора

Второй измерительный электрод подключили к ребру охлаждения радиатора.

Измерительные электроды подключились к мультиметру Agilent 34461A, включенного в режим регистрации данных.

В качестве термоинтерфейса использовалась паста кремнийорганическая теплопроводная Эласил 131-179 [52], с не истекшим сроком годности на момент проведения эксперимента (рисунок 54). Это вязкая паста непрозрачного серого цвета обладает хорошими изолирующими свойствами, применяется для отвода тепла от греющихся элементов в электронике и радиотехнике.

Перед нанесением паста тщательно перемешалась, а поверхности крышки корпуса процессора и радиатора тщательно очистились спиртом от посторонних частиц и жировых следов.

Сопрягаемую поверхность радиатора охлаждения тщательно очистили с помощью спирта и ветоши. Очищенная поверхность радиатора охлаждения до установки на крышку процессора представлена на рисунке 56.

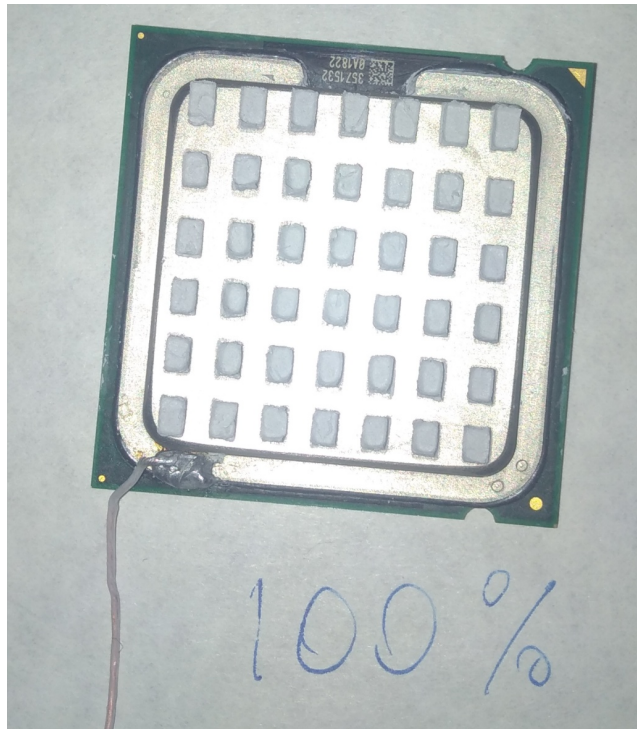


Рисунок 55. Крышка процессора с полностью нанесенным через трафарет термоинтерфейсом



Рисунок 56. Очищенная сопрягаемая поверхность радиатора

После установки радиатора на процессор, электрическое контактное сопротивление, измеренное мультиметром Agilent 34461A, было ниже 0,01 Ом, что говорит о гальванической связи и электрическом контакте между сопрягаемыми поверхностями, т.е. о соблюдении условий для возникновения термоЭДС при возникновении разницы температур между крышкой процессора и радиатором охлаждения.

У вентилятора охлаждения процессора была отключена цепь обратной связи, что бы он работал в одном и том же режиме, независимо от температуры процессора. Это позволит исключить неравномерность охлаждения радиатора с течением времени при подаче нагрузки.

Эксперимент проводился следующим образом. После включения, персональный компьютер работал без нагрузки до момента установления измеряемого термоЭДС на постоянном уровне, что говорит об установлении температурного равновесия между процессором и радиатором. После этого, с помощью программы AIDA64 запустили тест процессора, увеличивая загруженность процессора до 100%. Программа AIDA64 была запущена в ознакомительном режиме. Процессор выдерживался под нагрузкой в течение четырех минут. При этом с течением времени фиксировались следующие параметры: процент загрузки процессора, температура ядра процессора и возникающая термоЭДС между крышкой процессора и радиатором охлаждения. После выдержки процессора под нагрузкой в течение четырех минут, нагрузка снималась, и процессор выдерживался без нагрузки до установления температурного равновесия в течение трех минут. Графики вышеприведенных параметров приведены на рисунке 57.

Из графиков видно, что в начальный момент, при подаче нагрузки на процессор до 100% возникает выброс термоЭДС. Этот выброс вызван резким изменением температуры поверхности крышки радиатора, нагреваемой процессором. Радиатор имеет начальную температуру процессора - 50°C. Процессор в течение нескольких секунд нагревается до 68 °C.

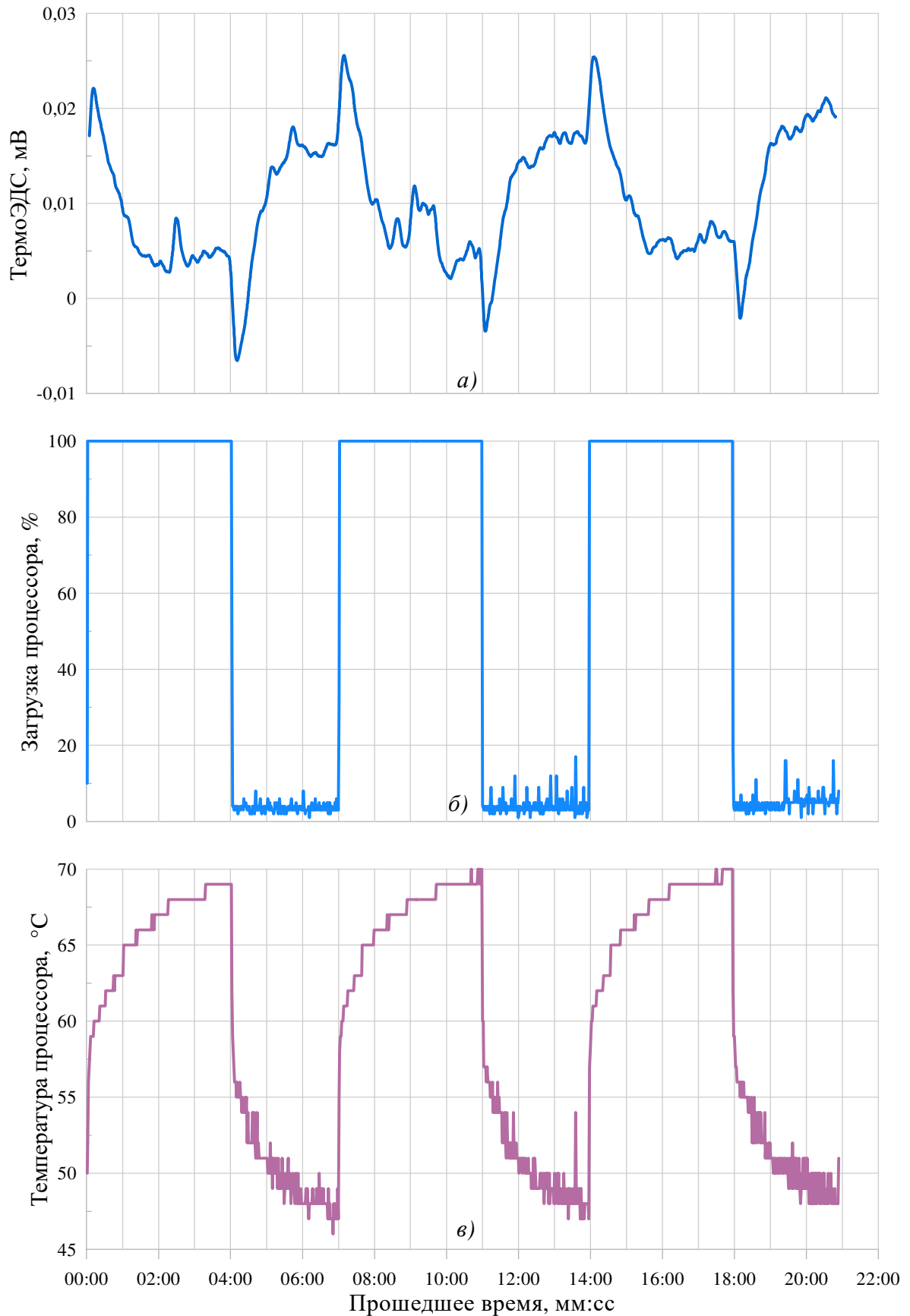


Рисунок 57. График зависимости термоЭДС (а), нагрузки процессора (б) и температуры процессора (в) от времени при нанесении термоинтерфейса на 100% площади

Теплоемкость радиатора по сравнению с корпусом процессора велика, и его собственная температура растет медленно. Из-за медленного роста температуры радиатора, и быстрого роста температуры процессора возникает большая разница температур между крышкой процессора и радиатором. Поэтому формируется выброс термоЭДС около 0,022 мВ в коротком промежутке времени после полной загрузки процессора.

На временном участке 02:00 – 04:00 термоЭДС установилась и держится на одном уровне – около 0,022 мВ, незначительные отклонения могут быть вызваны флуктуациями воздушной среды в помещении, в котором проводился эксперимент. Установившийся режим термоЭДС на данном временном участке объясняется постоянством разницы температур – система достигла теплового равновесия.

В момент 04:00 нагрузка с процессора снимается, появляется отрицательный выброс термоЭДС. Этот выброс объясняется тем, что при снятии нагрузки, температура процессора падает быстрее, чем температура радиатора из-за его малой теплоемкости. Часть тепла, накопленного радиатором, идет к корпусу процессора, вызывая отрицательный выброс термоЭДС.

В момент 06:00 – 07:00 термоЭДС установилась и держится на одном уровне – около 0,015 мВ, незначительные отклонения могут быть вызваны флуктуациями воздушной среды в помещении, в котором проводился эксперимент.

После выдержки в течение трех минут на холостом ходу температура радиатора опустилась до 47 °С.

Максимальная измеренная температура процессора – 70 °С.

Данный цикл повторился ещё два раза, поведение термоЭДС каждый раз было аналогичным.

После завершения эксперимента персональный компьютер выключили и отделили радиатор охлаждения от крышки процессора для визуального контроля качества нанесения термоинтерфейса. Фотография распределения

термоинтерфейса по поверхности корпуса процессора и радиатора охлаждения приведена на рисунке 58.



Рисунок 58. Распределение термоинтерфейса по поверхности корпуса процессора и радиатора охлаждения

Как видно из рисунка 58 нанесение термоинтерфейса через трафарет обеспечило равномерное распределение теплопроводящего пастообразного состава между сопрягаемыми поверхностями – после снятия радиатора с крышки процессора видно, что в термоинтерфейсе отсутствовали воздушные полости, а сама термопаста нанесена тонким слоем на каждый участок площади соприкосновения процессора с радиатором охлаждения. Неоднородность термоинтерфейса на рисунке 58 появилась при снятии радиатора из-за относительно высокой вязкости термоинтерфейса.

После завершения осмотра, сопрягаемые поверхности процессора и радиатора тщательно очистились с помощью спирта и ветоши.

Для следующего случая паста наносилась не на всю поверхность крышки процессора, а только на 75 % от общей площади. Паста наносилась в несколько слоев, каждый из которых размазывался резиновым шпателем до полного

заполнения полостей трафарета. Нанесенная на крышку корпуса процессора паста до установки радиатора для данного случая представлена на рисунке 59.



Рисунок 59. Крышка процессора с нанесенным на 75% площади через трафарет термоинтерфейсом

Эксперимент проводился таким же образом, как и ранее: после включения, персональный компьютер работал на холостом ходу до момента установления измеряемого термоЭДС на постоянном уровне, что говорит об установлении температурного равновесия между процессором и радиатором. После этого запустили тест процессора, увеличивая загрузку процессора до 100%. Процессор выдерживался под нагрузкой в течение четырех минут. При этом с течением времени фиксировались те же самые параметры, что и в предыдущем эксперименте, а именно: процент загрузки процессора, температура ядра процессора и возникающее термоЭДС между крышкой процессора и радиатором охлаждения. Графики вышеприведенных параметров приведены на рисунке 60.

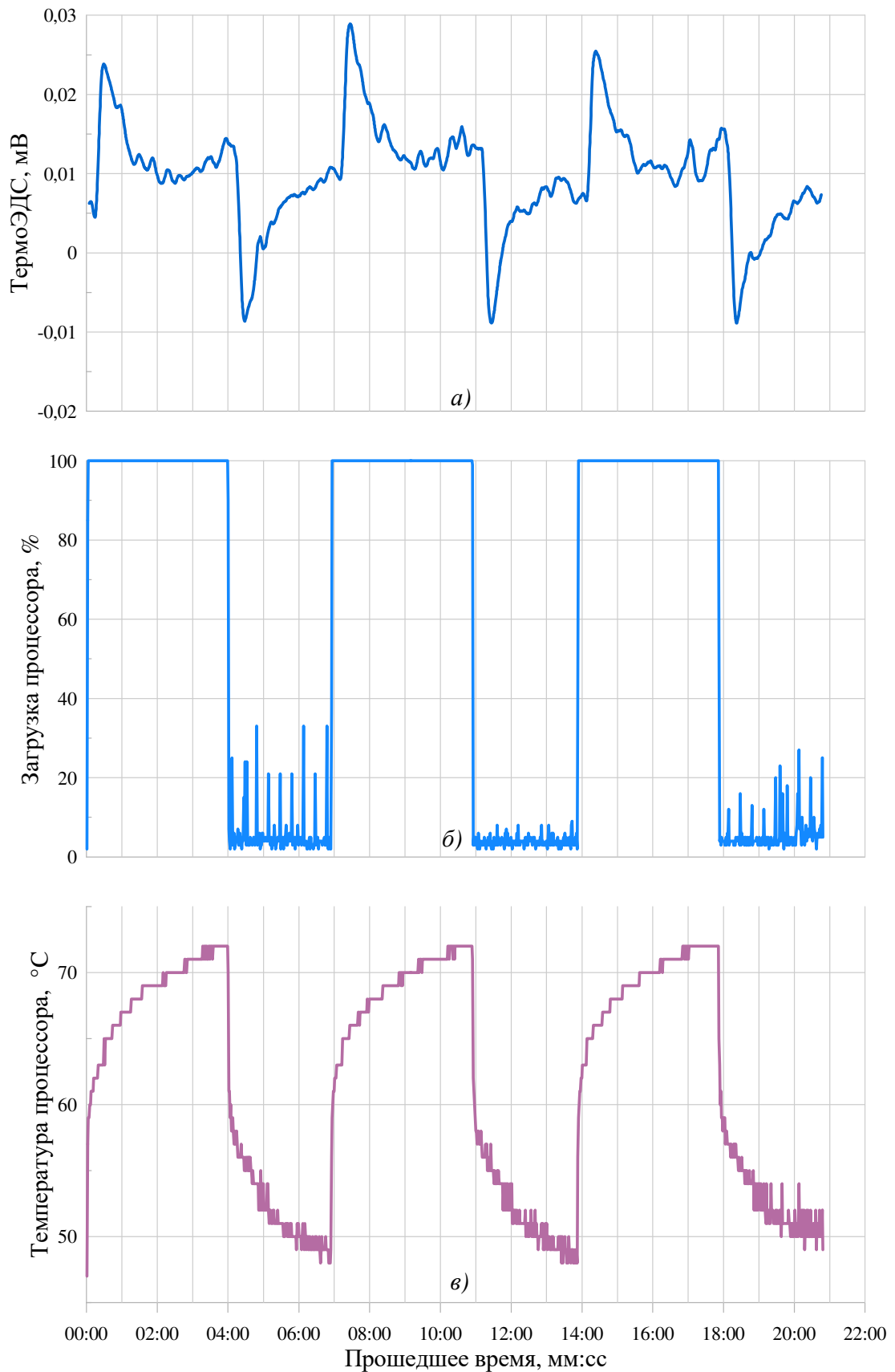


Рисунок 60. График зависимости термоЭДС (а), нагрузки процессора (б) и температуры процессора (в) от времени при нанесении термоинтерфейса на 75% площади соприкосновения

После выдержки процессора под нагрузкой в течение четырех минут, отключалась нагрузка, и процессор выдерживался на холостом ходу до установления температурного равновесия в течение трех минут.

Из графиков на рисунке 60 видно, что все процессы возникновения термоЭДС повторяются: при подаче нагрузки появляется импульс термоЭДС, после чего она достигает установившегося значения. Однако в данном случае среднее установившееся значение термоЭДС после изменения нагрузки как от 100% до холостого хода, так и от холостого хода до 100% составляет 0,0115 мВ. В случае с нанесением термоинтерфейса на всю площадь сопрягаемых поверхностей (рисунок 57) при набросе нагрузки установившееся значение термоЭДС было 0,025 мВ, а при сбросе – 0,005 мВ. Отличие в уровнях установившегося значения может быть вызвано дополнительным путем отвода тепла через низкое тепловое сопротивление качественно нанесенного термоинтерфейса обратно через крышку процессора. Таким образом создается дополнительное противоЭДС.

Максимальная измеренная температура процессора – 72 °С.

После выдержки в течение трех минут на холостом ходу температура радиатора опустилась до 48 °С.

Неравномерность нагрузки на холостом ходу вызвана внутренней активностью операционной системы компьютера и фоновыми процессами, обеспечивающих работоспособность.

После завершения эксперимента персональный компьютер выключили и отделили радиатор охлаждения от крышки процессора для визуального контроля качества нанесения термоинтерфейса. Фотография распределения термоинтерфейса по поверхности корпуса процессора и радиатора охлаждения приведена на рисунке 61.



Рисунок 61 Распределение термоинтерфейса по поверхности корпуса процессора и радиатора охлаждения при 75% занятой площади

Как видно из рисунка 61 нанесение термоинтерфейса через трафарет обеспечило равномерное распределение теплопроводящего пастообразного состава между сопрягаемыми поверхностями – после снятия радиатора с крышки процессора видно, что термопаста нанесена тонким равномерным слоем на каждый участок площади соприкосновения процессора с радиатором охлаждения. После снятия радиатора так же стало видно, что термопаста занимает около 75% от общей площади сопрягаемых поверхностей. Неоднородность термоинтерфейса на рисунке 61 появилась при снятии радиатора из-за относительно высокой вязкости термоинтерфейса.

После завершения осмотра, сопрягаемые поверхности процессора и радиатора тщательно очистились с помощью спирта и ветоши.

Для следующего случая паста наносилась не на всю поверхность крышки процессора, а только на 50 % от общей площади. Паста наносилась в несколько

слоев, каждый из которых размазывался резиновым шпателем до полного заполнения полостей трафарета. Нанесенная на крышку корпуса процессора паста до установки радиатора для данного случая представлена на рисунке 62.



Рисунок 62. Крышка процессора с нанесенным на 50% площади через трафарет термоинтерфейсом

Эксперимент проводился таким же образом, как и ранее: после включения, персональный компьютер работал на холостом ходу до момента установления измеряемого термоЭДС на постоянном уровне, что говорит об установлении температурного равновесия между процессором и радиатором. После этого запустили тест процессора, увеличивая загрузку процессора до 100%.

Процессор выдерживался под нагрузкой в течение четырех минут. При этом с течением времени фиксировались те же самые параметры, что и в предыдущем эксперименте, а именно: процент загрузки процессора, температура ядра процессора и возникающее термоЭДС между крышкой процессора и радиатором охлаждения.

После выдержки процессора под нагрузкой в течение четырех минут, отключалась нагрузка, и процессор выдерживался на холостом ходу до установления температурного равновесия в течение трех минут.

Графики вышеприведенных параметров приведены на рисунке 63.

Из графиков, представленных на рисунке 63 видно, что все процессы возникновения термоЭДС повторяются: при подаче нагрузки появляется импульс термоЭДС, после чего она достигает установившегося значения. Однако в данном случае среднее установившееся значение термоЭДС после изменения нагрузки становится значительно больше, чем начальный выброс термоЭДС и составляет около 0,047 мВ, что превышает почти в 1,5 раза аналогичные значения для предыдущих случаев.

Постоянная составляющая термоЭДС при снятии нагрузки составила в среднем 0,13 мВ.

Максимальная измеренная температура процессора – 78 °С.

После выдержки в течение трех минут на холостом ходу температура радиатора опустилась до 50 °С.

После завершения эксперимента персональный компьютер выключили и отделили радиатор охлаждения от крышки процессора для визуального контроля качества нанесения термоинтерфейса. Распределение термоинтерфейса после снятия радиатора приведено на рисунке 64.

Как видно из рисунка 64 нанесение термоинтерфейса через трафарет обеспечило равномерное размерное нанесение теплопроводящего пастообразного состава между сопрягаемыми поверхностями – после снятия радиатора с крышки процессора видно, что термопаста нанесена тонким равномерным слоем на каждый участок площади соприкосновения процессора с радиатором охлаждения. После снятия радиатора так же стало видно, что термопаста занимает около 50% от общей площади сопрягаемых поверхностей. Неоднородность термоинтерфейса на рисунке 64 появилась при снятии радиатора из-за относительно высокой вязкости термоинтерфейса.

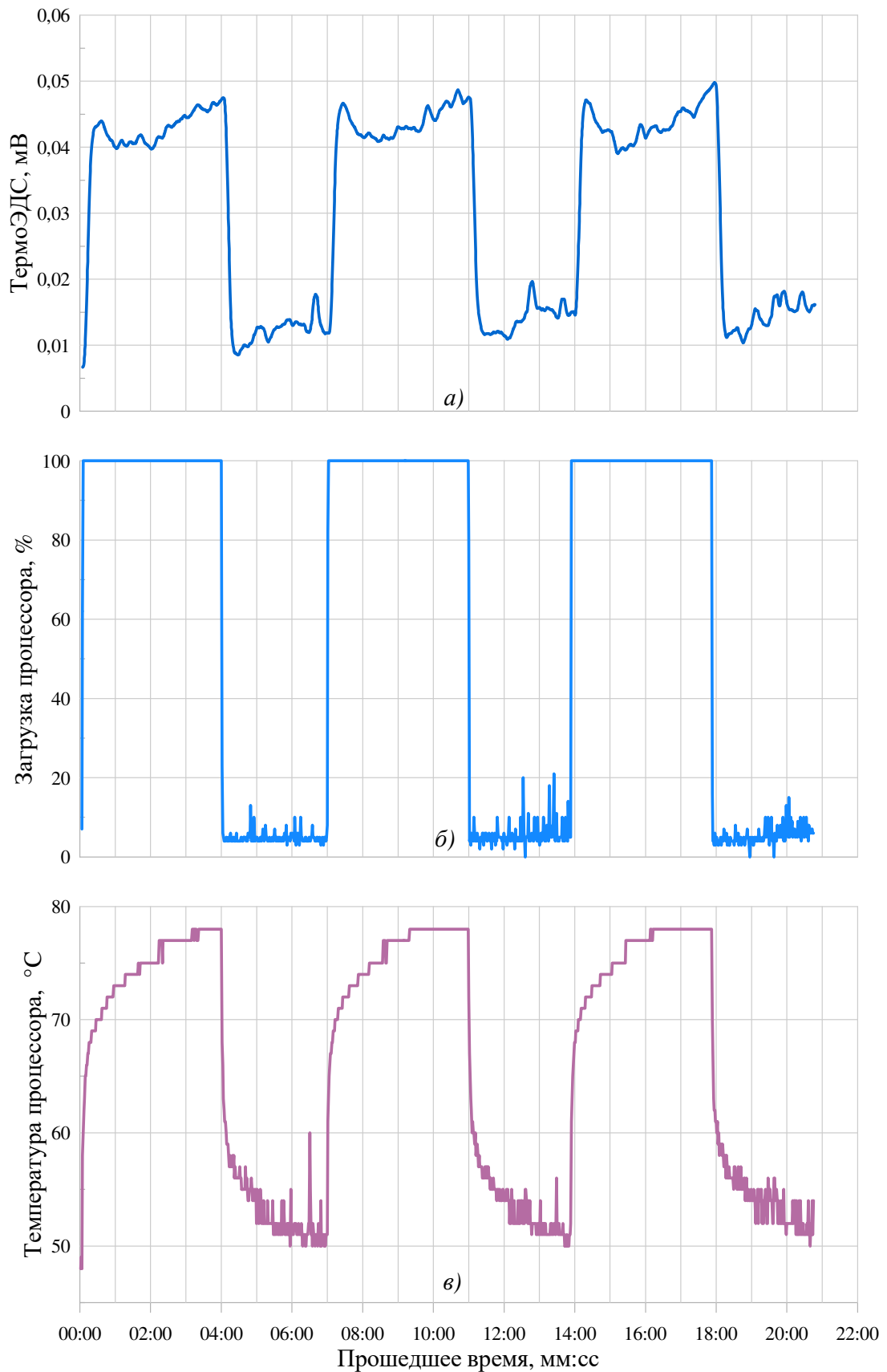


Рисунок 63. График зависимости термоЭДС (а), нагрузки процессора (б) и температуры процессора (в) от времени при нанесении термоинтерфейса на 50% площади соприкосновения

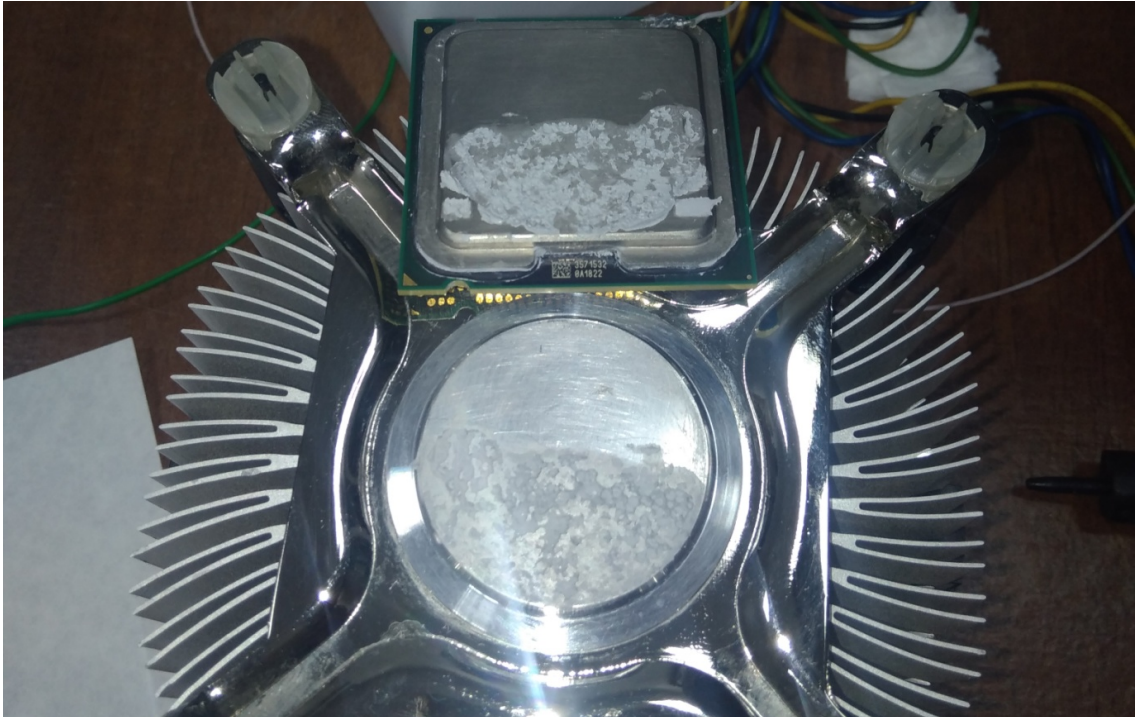


Рисунок 64. Распределение термоинтерфейса по поверхности корпуса процессора и радиатора охлаждения при 50% занятой площади

Для следующего случая паста наносилась не на всю поверхность крышки процессора, а только на 25 % от общей площади. Паста наносилась в несколько слоев, каждый из которых размазывался резиновым шпателем до полного заполнения полостей трафарета. Нанесенная на крышку корпуса процессора паста до установки радиатора для данного случая представлена на рисунке 65.



Рисунок 65. Нанесенный термоинтерфейс на корпус процессора для случая использования 25% площади поверхности корпуса процессора

Эксперимент проводился таким же образом, как и ранее: после включения, персональный компьютер работал на холостом ходу до момента установления измеряемого термоЭДС на постоянном уровне, что говорит об установлении температурного равновесия между процессором и радиатором. Графики измеряемых параметров приведены на рисунке 66. После этого запустили тест процессора, увеличивая загруженность процессора до 100%.

Однако после подачи нагрузки на процессор температура и термоЭДС начали расти не останавливаясь.

Не дожидаясь достижения времени выдержки под нагрузкой 4 минуты, в момент времени 01:20 нагрузка была снята, т.к. температура процессора в этот момент превысила 90 °С, а перегрев процессора мог повлечь необратимые последствия.

Максимальное значение термоЭДС было 0,11 мВ, что в 10 раз больше, чем при 100% покрытии термоинтерфейсом площади корпуса процессора.

После снятия нагрузки, процессор выдерживался на холостом ходу до установления температурного равновесия. Температура процессора при этом стала 56 °С. ТермоЭДС в установившемся режиме стало 0,03 мВ, что так же в несколько раз превышает значения для случая с нормально нанесенным термоинтерфейсом.

Нагрузку подавали таким же образом ещё 2 раза, все процессы распространения тепла и возникновения термоЭДС повторились тем же самым образом.

После завершения эксперимента персональный компьютер выключили и отделили радиатор охлаждения от крышки процессора для визуального контроля качества нанесения термоинтерфейса. Нанесенный термоинтерфейс после снятия радиатора приведен на рисунке 67.

Эксперимент с не нанесенным термоинтерфейсом было решено не проводить, т.к. даже частично нанесенный термоинтерфейс не обеспечивает качественный отвод тепла, а дорогостоящее оборудование может выйти из строя от перегрева.

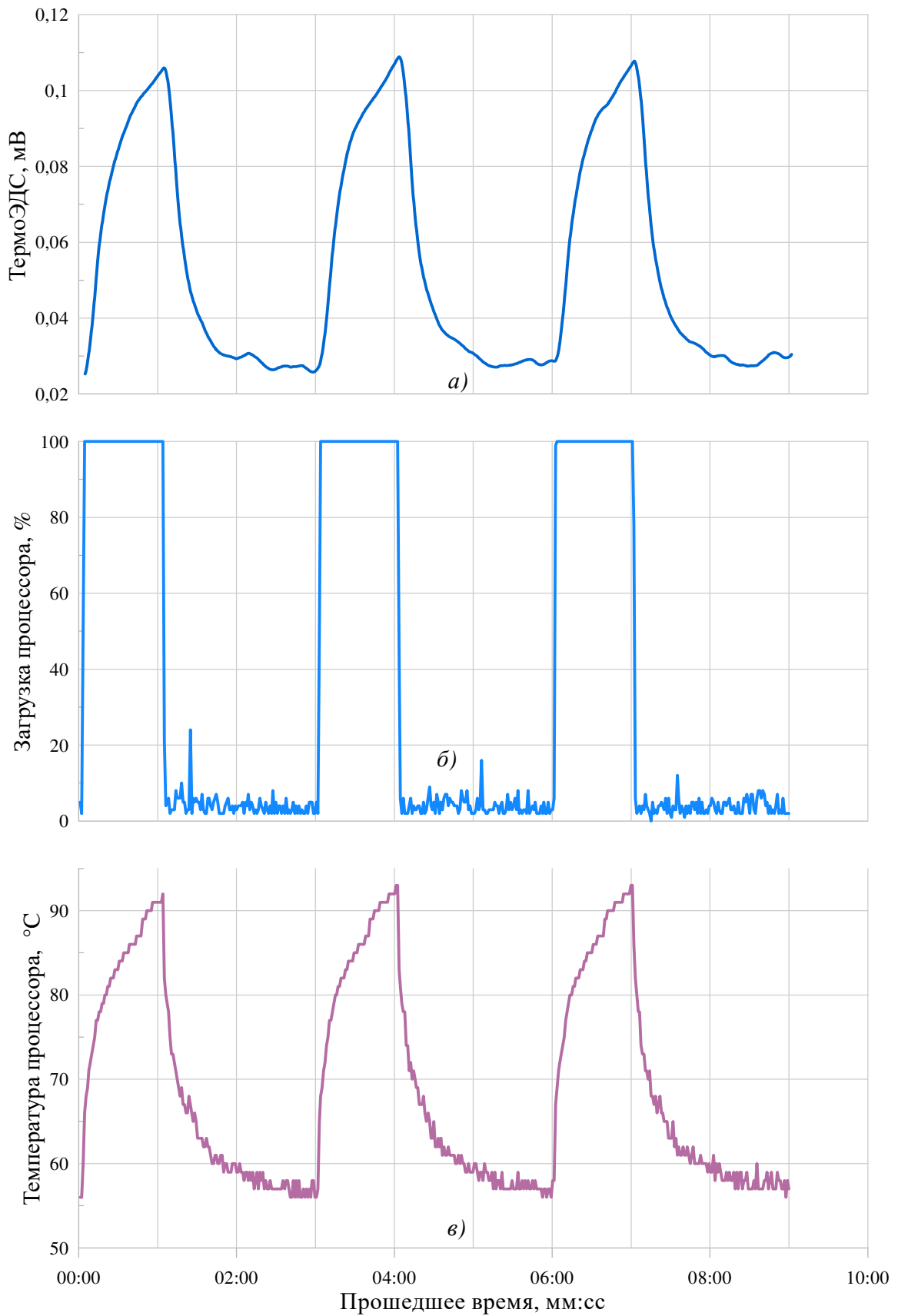


Рисунок 66. График зависимости термоЭДС (а), нагрузки процессора (б) и температуры процессора (в) от времени при нанесении термоинтерфейса на 25% площади соприкосновения

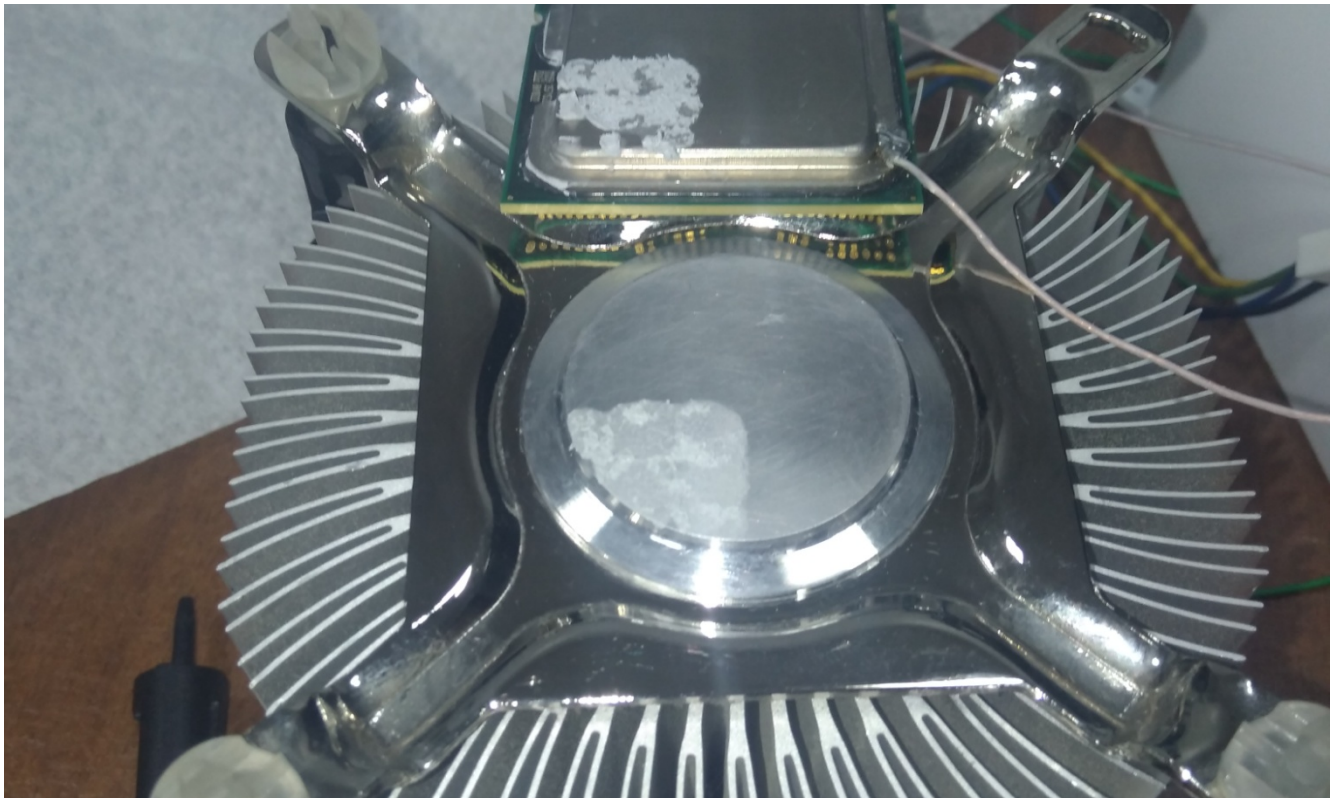


Рисунок 67. Распределение термоинтерфейса по поверхности корпуса процессора и радиатора охлаждения при 25% занятой площади

Как видно из рисунка 67 нанесение термоинтерфейса через трафарет обеспечило равномерное размерное нанесение теплопроводящего пастообразного состава между сопрягаемыми поверхностями – после снятия радиатора с крышки процессора видно, что термопаста нанесена тонким равномерным слоем на каждый участок площади соприкосновения процессора с радиатором охлаждения. После снятия радиатора так же стало видно, что термопаста занимает около 25% от общей площади сопрягаемых поверхностей. Неоднородность термоинтерфейса на рисунке 67 появилась при снятии радиатора из-за относительно высокой вязкости термоинтерфейса.

Основные данные, полученные в ходе исследования приведены в таблице 6.

Для наглядности, по полученным данным построены графики зависимости исследуемых величин от процента нанесения термоинтерфейса. Данные графики приведены на рисунке 68.

Таблица 6. Основные данные эксперимента с процессором персонального компьютера

Процент нанесения, %	Максимальное значение под нагрузкой		Установившееся значение на холостом ходу	
	Температуры процессора, °С	ТермоЭДС, мВ	Температуры процессора, °С	ТермоЭДС, мВ
100	68	0,024	46	0,005
75	72	0,025	48	0,011
50	78	0,047	50	0,017
25*	92	0,114	58	0,0275

* Эксперимент прерван из-за сильного перегрева процессора, приведено максимальное зафиксированное значение при неустановившемся режиме.

Из приведенных на рисунке 68 графиков видно, что при уменьшении площади покрытия корпуса процессора термоинтерфейсом увеличивается как максимальное значение температуры процессора, так и термоЭДС между крышкой процессора и радиатором охлаждения.

Однако стоит отметить, что зависимость максимального значения термоЭДС при воздействии нагрузки на процессор имеет значительную нелинейность по сравнению с температурой из-за разных параметров теплового сопротивления отводящих линий тепла у процессора и радиатора и их теплоемкости.

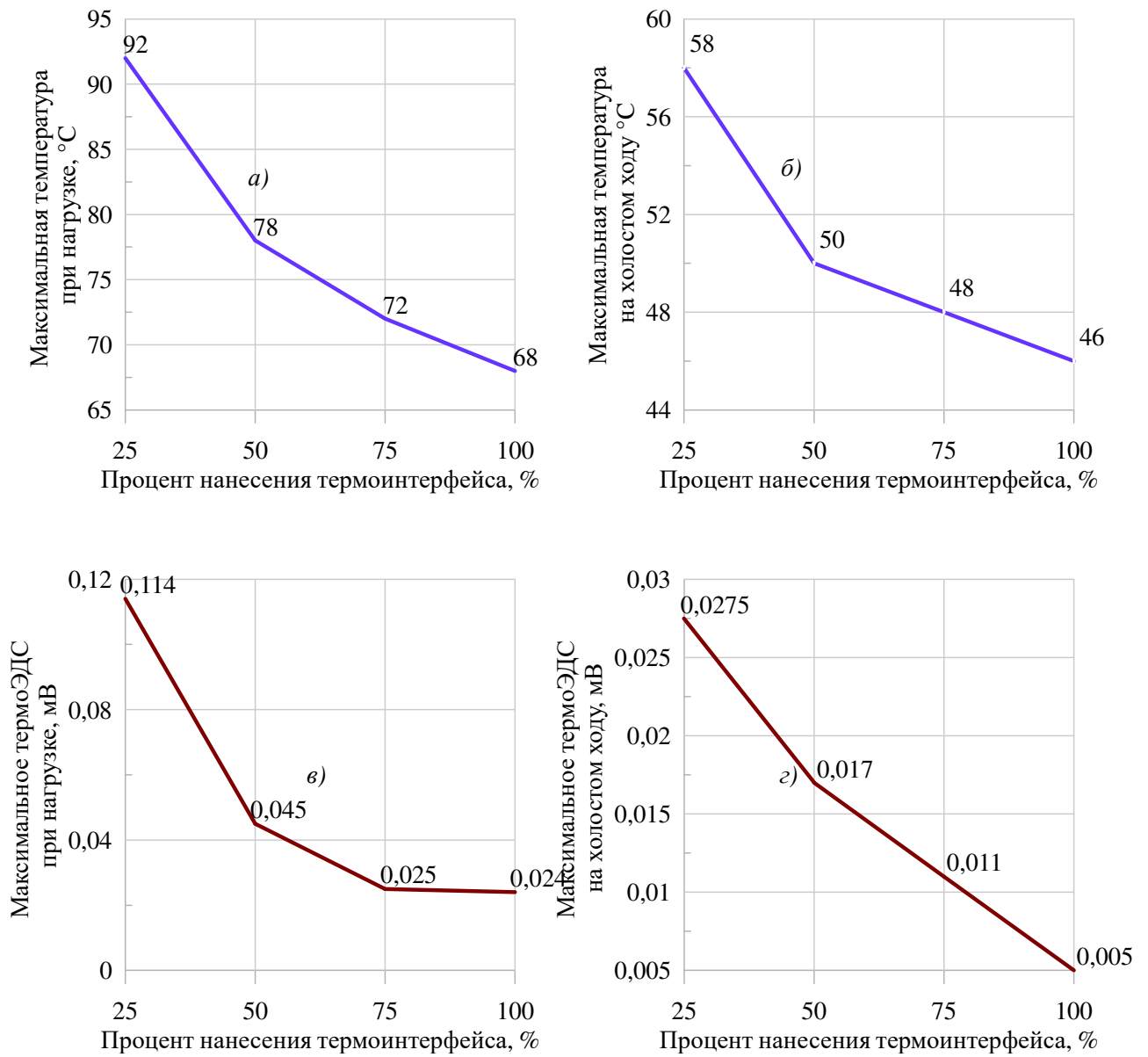


Рисунок 68. Графики зависимости максимальных значений под нагрузкой процессора – а) температуры процессора, б) термоЭДС, и без нагрузки - в) температуры процессора, г) термоЭДС,

ВЫВОДЫ

Исследования, проведенные на экспериментальной установке подтвердили правильность теоретических исследований, выполненных во второй главе.

Получены корреляционные зависимости термоЭДС от теплофизических параметров термоинтерфейса КПТ-8

Показана возможность контроля теплофизических параметров термоинтерфейса без демонтажа конструкции корпус силового прибора-термоинтерфейс-радиатор охлаждения при использовании известной корреляционной зависимости.

Погрешность полученной корреляционной зависимости термоЭДС от теплового сопротивления не превышает 6%.

Способ и устройство контроля защищены патентами РФ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненной работы исследованы корреляционные зависимости термоЭДС от теплофизических параметров термоинтерфейса КПТ-8.

Предложен термоэлектрический способ неразрушающего контроля теплофизических параметров термоинтерфейса, учитывающий температурную зависимость термоЭДС и теплопроводящие и электропроводящие свойства материалов объектов.

Проведены теоретические и экспериментальные исследования зависимости термоЭДС.

Исследовано влияние погрешностей, вносимых измерительными электродами, состоящих из разнородных материалов на величину термоЭДС и предложен способ его компенсации.

Разработан макетный образец устройства и проведены его испытания.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Абызов А. М. Теплопроводность композита алмаз-парафин / А. М. Абызов, С. В. Кидалов, Ф. М. Шахов // Физика твердого тела. –2011. –№ 1. –с. 48–51.
2. Афанасов В. И. Методы неразрушающего контроля: учебное пособие. Ч. 1. Неразрушающие методы контроля материалов и изделий / В. И. Афанасов, Н. И. Кашубский, А. А. Кузнецов. – Красноярск: ИПК СФУ, 2009. –с. 104.
3. Бацула А. П. Конструирование радиоэлектронных устройств: учебное пособие / А. П. Бацула. –Томск: Томский межвузовский центр дистанционного образования, 2002. –с. 53–64.
4. Беляев А. Е. Влияние перегрева р–n-перехода на деградацию мощных импульсных кремниевых лавинно-пролетных диодов / А. Е. Беляев, В. В. Басанец, Н. С. Болтовец // Физика твердого тела. –2011. –№2. –с. 256–262,
5. Беспалов Н. Н. Метод определения теплового сопротивления биполярных транзисторов с изолированным затвором / Н. Н. Беспалов, В. Г. Мясин // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы XIII всероссийской научно-технической конференции. – Чебоксары, 2019 –с. 259–261.
6. Блатт Ф. Дж. Термоэлектродвижущая сила металлов : пер. с англ. / Ф. Дж. Блатт [и др.] – М. : Металлургия, 1980. –с. 248.
7. Болтовец Н. С. Исследование перегрева р-n-перехода на деградацию мощных импульсных кремниевых лавиннопролетных диодов / Н. С. Болтовец, Р. В. Конакова, Я. Я. Кудрик// Современные проблемы физики полупроводников: материалы конференции. – Нукус, 2011 – с. 13.
8. Брюханов О. Н. Тепломассообмен: учебное пособие / О. Н. Брюханов, С. Н. Шевченко. – М.: АСВ, 2005. –с. 460.
9. Бухмиров В. В. Расчет теплопередачи через непроницаемые стенки / В. В. Бухмиров, Т. Е. Созинова, Ю. С. Солнышкова. – Иваново: Ивановский гос. энергетический ун–т им. В. И. Ленина, 2015. –с. 7–8.

10. Вавилов В. П. Тепловые методы неразрушающего контроля: справочник / В. П. Вавилов. – М. : Машиностроение, 1991. – с. 245.
11. Войтович Р. Ф. Окисление карбидов и нитридов / Р. Ф. Войтович. – Киев : Наукова думка, 1981. – с. 162.
12. Гаркушин И. К. Словарь-справочник по физико-химическому анализу / И. К. Гаркушин, М. А. Истомова. – Самара: СГТУ, 2012. – с. 184.
13. Годунов С. К. Разностные схемы (введение в теорию): учебное пособие / С. К. Годунов, В. С. Рябенский. – М. : Наука, 1977. – с. 210–212.
14. Гордов А. Н. Основы температурных измерений / А. Н. Гордов, О. М. Жагулло, А. Г. Иванова. – М. : Энергоатомиздат, 1992. – с. 302.
15. ГОСТ 19656.15–84. Диоды полупроводниковые СВЧ. Методы измерения теплового сопротивления переход–корпус и импульсного теплового сопротивления. М. : Изд-во стандартов, 1984. – 21 с.
16. ГОСТ 19783–74 Паста кремнийорганическая теплопроводная. Технические условия. М. : Изд-во стандартов, 1974. – 10 с.
17. ГОСТ 24643–81 Основные нормы взаимозаменяемости. Допуски формы и расположения поверхностей. Числовые значения. М. : Изд-во стандартов, 2004. – 9 с.
18. ГОСТ 265–77 Резина. Методы испытаний на кратковременное статическое сжатие. М. : Изд-во стандартов, 2001. – 6 с.
19. ГОСТ 6402-70. Шайбы пружинные. Технические условия. – М. : Стандартинформ, 2006. – 6 с.
20. Гулд Х. Компьютерное моделирование в физике / Х. Гулд, Я. Тобочник. – М. : Мир, 2001. – 752 с.
21. Дитер Э. Теплопроводящая паста – это действительно важно / Э. Дитер, М. Штрубе, А. Колпаков // Компоненты и технологии. – 2010. – №6. – С. 88–90.
22. Дрекседж П. Применение термопасты в силовой электронике: практические аспекты основные положения / П. Дрекседж, П. Бекедаль, А. Колпаков // Силовая электроника. – 2018. – № 75. – С. 50–60.

23. Елагин А. А. Обзор теплопроводных материалов и термопаст на их основе / Елагин А. А.[и др.] // Вестник Казанского технологического университета. –2013. –Т. 16. –№ 4. –С. 132–136.
24. Задорожный Н. А. Распределение Ферми – Дирака. Явление Зеебека / Н. А. Задорожный [и др.]. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2013. –с. 86.
25. Звездина Н. А. Молекулярная физика. Термодинамика / Н. А. Звездина [и др.]. –Екатеринбург: Изд-во Уральского Федерального ун-та. –2015. –с. 4–6.
26. Зигель Р. Теплообмен излучением: Пер. с англ / Р. Зигель, Дж. Хауэлл. –М. : Изд-во «Мир», 1975. –124 с.
27. Ковеня В. М. Методы конечных разностей и конечных объемов для решения задач математической физики: учебное пособие / В. М. Ковеня, Д. В Чирков. – Новосибирск: НГУ, 2013. –С. 24–26.
28. Колпаков А. Возвращаемся к термопасте / А. Колпаков // Силовая Электроника. –2015. –№3. –С. 93.
29. Колпаков А. Компаунд, паста или пленка? / А. Колпаков // Силовая Электроника. –2008. –№3. –С.130–134.
30. Колпаков А. Силовые модули SEMITOR как альтернатива дискретным корпусам ТО / А. Колпаков // Силовая Электроника. –2004. –№ 2. –С. 32–35.
31. Коротких А. Г. Теплопроводность материалов /А. Г. Коротких. –Томск: Изд-во Том. Политехн. ун-та, 2011. –23–25 с.
32. Крайнов А. Ю. Численные методы в задачах теплопереноса / А. Ю. Крайнов, Ю. Н. Рыжих, А. М Тимохин. –Томск: ТГУ, 2009. –58 с.
33. Краус А. Д. Охлаждение электронного оборудования / А. Д Краус. –Л. : Энергия, 1979. –70 с.
34. Кузнецов И. А. Термоэлектрические датчики для контроля качества материалов и изделий без разрушения / И. А Кузнецов // Дефектоскопия. –1973. –№1. –С. 5–12.
35. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена / С. С. Кутателадзе. – М. : Атомиздат, 1979. –120-123 с.

36. Лившиц Б. Г. Физические свойства металлов и сплавов / Б. Г. Лившиц, В. С. Крапоткин, Я. Л. Линецкий. – М. : Металлургия, 1980. –229–235 с.

37. Лидер И. А. Контроль тепловых параметров полупроводниковых приборов с использованием переходных тепловых характеристик / И. А. Лидер, В. П. Худоногов, В. Н. Гейман // Решетневские чтения: сборник материалов. – Красноярск, 2012. –Т. 1. –С. 320.

38. Лукина Н.Ф. Токопроводящий эпоксидный клей для приборной техники / Н. Ф. Лукина, А. П. Петрова, И. А. Авдоница // Клеи. Герметики. Технологии. – 2006. –№8. С. 4–6.

39. Лухвич А. А. Структурная зависимость термоэлектрических свойств и неразрушающий контроль / А. А. Лухвич, В. И. Шарандо, А. С. Каролик. – Мн. : Наука и техника, 1990. –192 с.\

40. Мальцев И. А. Экспресс-контроль теплового сопротивления полупроводниковых приборов в режиме докритических тепловых воздействий : автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.11.13 // Мальцев Иван Алексеевич. 2016 – 6 с.

41. Мальцев И. А. Измерение теплового сопротивления переход-корпус современных светодиодов в стационарном тепловом режиме / И. А. Мальцев, А. А. Мальцев // Проблемы и перспективы развития наукоемкого машиностроения: материалы международной научно-технической конференции. - Казань. 2013. –С. 342-344.

42. Мануйлов А. В. Основы химии / А. В. Мануйлов, В. И. Родионов. – М. : Изд-во Центрполиграф, 2014. –203–206 с.

43. Мартинсон Л. К. Квантовая физика / Л. К. Мартинсон, Е. В. Смирнов. - М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. –352–354 с.

44. Мельников. С. Тестирование термопаст / С. Мельников // Железо. –2007. –№14. –С. 16.

45. Микросхемы интегральные 1156ЕУ2АТ, 1156ЕУ3Т : технические условия / АО «Ангстрем». АЕЯР.431420.742-01 ТУ. 2010.

46. Микросхемы интегральные 1308ЕУ3АУ, 1308ЕУ3БУ, 1308ЕУ4АУ, 1308ЕУ4БУ : технические условия / АО «Ангстрем». АЯЕР.431420.665-03ТУ 2009.

47. Ногачева Т. И. Локальный метод измерения термоэлектрической способности поверхностного слоя металлических изделий и его использование при неразрушающем контроле других физических величин / Т. И. Ногачева, Е. В. Кузнецова. – Орел: Известия ОрелГТУ. Машиностроение. Приборостроение, 2005. –7–14 с.

48. Окунев Д. Стресс тесты для процессоров серии 8350 / Д. Окунев // Железо. –2008. –№26. –С. 25.

49. ОСТ 11 0944–96. Микросхемы интегральные и приборы полупроводниковые. Методы расчета, измерения и контроля теплового сопротивления. – М. : ГУП НПП Пульсар, 1997. – 110 с.

50. ОСТ 92.0948-74 Клеи. Выбор и назначение. Технические требования.1974.–128 с.

51. Пат. 2685769 Российская Федерация, Способ определения переходного теплового сопротивления кристалл-корпус и теплового сопротивления кристалл-корпус в состоянии теплового равновесия транзисторов с полевым управлением / Беспалов Н. Н., Мясин В. Г; опубл. 03.07.2018.

52. Паста теплопроводная 131-179. ТУ 20.59.41-187.00209013-2017.

53. Порохов А. М. Физическая энциклопедия / А. М. Порохов. – М. : Большая Российская энциклопедия, 1998. –98–99 с.

54. Приборы серии Keysight Truevolt: руководство пользователя. Keysight Technologies, Inc, 2018. С. 185-193.

55. Прохоров А. М. Физическая энциклопедия. / Прохоров А. М. – М. : Советская энциклопедия, 1998. –97–98 с.

56. Путилов К. А. Курс физики: учеб. пособие. Т. II. Учение об электричестве / К. А. Путилов. – М. : Гостехтеориздат, 1954. –156 с.

57. Процессор Intel Core i9-9900К. URL: <https://clck.ru/H6HMh> (дата обращения 22.04.2020).

58. Рихтмайер Р. Разностные методы решения краевых задач / Р. Рихтмайер, К. Мортон. – М. : Изд-во «Мир», 1972. –420 с.
59. Самарский А. А. Вычислительная теплопередача / А. А. Самарский, П. Н. Вабищевич. – М. : Либрококом, 2009. –13–14 с.
60. Светозаров В. В. Основы статической обработки результатов измерений: учебное пособие / В. В. Светозаров. – М. : Изд-во МИФИ, 1983. –40 с.
61. Сивухин С. Д. Общий курс физики / С. Д. Сивухин. – М. : Наука, 1977. –Т. 3. Электричество. –481–487 с.
62. Силиконовые материалы Dow Corning для производства электроники. Руководство по выбору материалов. ЗАО Предприятие Ostec, г. Москва, 2010 г.
63. Смирнов В. И. Спектральный и временной методы измерения теплового сопротивления полупроводниковых приборов / В. И. Смирнов // Промышленные АСУ и контроллеры. –2014. –№ 10. –С. 58–60.
64. Смирнов В. И. Спектральный метод измерения теплового сопротивления светодиодов и оценка оптимальных режимов его реализации / Смирнов В. И. // Автоматизация процессов управления. –2014. –№ 2. –С. 28–35.
65. Смирнов В. И. Метод измерения компонент теплового сопротивления полупроводниковых приборов и его практическая реализация / Смирнов В. И [и др.] // Автоматизация процессов управления. –2017. –№ 2. –С. 96-103.
66. Смирнов М. Применение теплопроводящей пасты / М. Смирнов // Производство электроники. –2013. –№ 3. –С. 120.
67. Солдатов А. А. Контроль качества нанесения теплопроводящего компаунда / А. А. Солдатов, А. А. Дементьев, А. И. Солдатов, И. М. Васильев // Дефектоскопия. –2020. –№ 3. –С. 65-71.
68. Солнцев Б. А. Влияние паразитной термо-ЭДС на точность измерения температуры резания методом естественной термопары / Солнцев Б. А // Производительная обработка и технологическая надёжность деталей машин. – 1979. –№8. –С 42.
69. Технические характеристики листовых материалов номакон : технические условия / «Номакон» ТУ РБ 100009933.004;

70. Тихонов А. Н. Уравнения математической физики / А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. – М. : Наука, 1972. –552-555 с.
71. Транзисторы 2П767В2 : технические условия / АО «Ангстрем». АЕЯР.432140.273 ТУ. 2010.
72. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров: Пер. с англ / Х. Уонг. – М. : Атомиздат, 1979. –22с.
73. Флоренцев С.Н. Тенденции развития силовой электроники начала тысячелетия / С. Н. Флоренцев // Электроника. –2003. –№ 6. –С. 3–9.
74. Хопфе С. Plug & play: применение силовых модулей с предварительно нанесенной термопастой / С. Хопфе, А. Винтрих, А. Колпаков // Силовая электроника. –2017. –Т. 3. –№ 66. –С. 12–18.
75. Шевченко О. Ю. Основы физики твердого тела: учебное пособие / О. Ю Шевченко. –СПб. : Изд-во СПбГУ ИТМО, 2010. –31–35 с.
76. Шуберт Ф. Светодиоды / Пер. с англ. под ред. А.Э. Юновича. — 2-е изд. / Ф. Шуберт. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. С. 130.
77. An experimental setup for studying electric characteristics of thermocouples / A. I. Soldatov [et al.] // XIII International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). 2017. P. 1–4.
78. Anatyshuk L. I. On the discovery of thermoelectricity by volta. Journal of thermoelectricity. Черновцы: Институт термоэлектричества Национальной академии наук и Мин. Обр. и науки Украины, 2004. №2. С. 5–10.
79. Carreon H. Thermoelectric detection of spherical tin inclusions in copper by magnetic sensing // J. Appl. Phys. 2000. Vol.88, Issue 11. P. 6495.
80. Carreon H. Thermoelectric nondestructive evaluation of residual stress in shot-peened metals / H. Carreon, P.B. Nagy, V.P. Blodgett. – Res. Nondestr. Eval. 14, 2002. – p 59-80.
81. Control system for device «thermotest» / А. А. Soldatov [et al.] // XII International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). 2016. P. 1–5.

82. Dieter E. Thermal Paste Application. Rev. 7, SEMIKRON INTERNATIONAL GmbH 2010.
83. Drexhage P, Beckedahl P. Thermal Paste Application. SEMIKRON, 2018.
84. Esau D. Thermal Paste Application. SEMIKRON, 2010. 3 p.
85. Graphics card GeForce GTX 1080. Specification. URL: <https://clck.ru/NNJnS> (дата обращения 20.04.20)
86. JEDEC Standard JESD51–14. Transient Dual Interface Test Method for the Measurement of the Thermal Resistance Junction to Case of Semiconductor Devices with Heat Flow through a Single Path.
87. Nagy P. B. Thermoelectric NDE for thermal aging of cast stainless steel reactor components / Peter B. Nagy, Santosh Raja. –24 p.
88. Poppe A. Multi-domain compact modeling of LEDs: An overview of models and experimental data // Microelectronics Journal. 2015. V. 46. pp. 1138–1151.
89. Schulz M. Thermal Interface – An Inconvenient Truth. Article Bodo’s Power Systems, 2010, (6).
90. Stuart C. M. The Seebeck effect as used for the nondestructive evaluation of metals // Adv. Nondestr. Test. 1983. Vol. 9.
91. Surface inspection problems in thermoelectric testing / A. A. Abouellail [et al] // MATEC Web Conf. 2017. Vol. 102.
92. Szekely V. and Tran Van Bien: Fine structure of heat flow path in semiconductor devices: a measurement and identification method // Solid-State Electronics. 1988. V. 31. pp. 1363–1368.
93. T3ster. Fast, accurate and repeatable semiconductor thermal transient test technology for measurement and characterization. URL: <https://clck.ru/NNJrr> (дата обращения 20.04.20).
94. TechnoPowerUp. What wattage do I need for Ryzen 3700x and GTX 1080 Ti? URL: <https://clck.ru/NNJwy> (дата обращения 21/04/2020).
95. Thermal Impedance Measurement for Insulated Gate Bipolar Transistors – (Delta VCE(on) Method). JEDEC JESD24-12 standard.

96. Thermal Interface Materials for Electronics Cooling // Parker Chromerics. 2012. –pp 31-32.
97. Thermal Impedance Measurements for Vertical Power MOSFETs (Delta Source-Drain Voltage Method). JEDEC JESD24-3 standard.
98. United States Patent. US 7,445,727 B2. Nov. 4. 2008.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ
ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

УТВЕРЖДАЮ



Главный инженер ООО «ЛЭМЗ-Т»

Леденёв С.В.

Внедрения результатов научно-исследовательской работы
«ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОПРОВОДЯЩЕЙ
ПАСТЫ (ТЕРМОИНТЕРФЕЙСА)»

Настоящим актом подтверждается, что результаты научно-исследовательской работы Васильева Ивана Михайловича «Термоэлектрический метод контроля теплофизических параметров теплопроводящей пасты (термоинтерфейса)» используются на предприятии ООО «ЛЭМЗ-Т».

Предложенное устройство и способ контроля качества нанесения термоинтерфейса позволяют проводить контроль установки силовых полупроводниковых приборов на радиатор охлаждения после монтажа, что исключает возможность появления перегрева силовых приборов в электронных блоках, изготавливаемых на предприятии ООО «ЛЭМЗ-Т».

Начальник сектора 148

Королёв А.П.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. АКТ ВНЕДРЕНИЯ РАЗРАБОТКИ В УЧЕБНЫЙ ПРОЦЕСС ТПУ



Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation
Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education
«National Research Tomsk Polytechnic University» (TPU)
30, Lenin ave., Tomsk, 634050, Russia
Tel. +7-3822-606333, +7-3822-701779,
Fax +7-3822-606444, e-mail: tpu@tpu.ru, tpu.ru
OKPO (National Classification of Enterprises and Organizations):
02069303,
Company Number: 027000890168,
VAT/KPP (Code of Reason for Registration)
7018007264/701701001, BIC 046902001

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский
Томский политехнический университет» (ТПУ)
Ленина, пр., д. 30, г. Томск, 634050, Россия
тел.: +7-3822-606333, +7-3822-701779,
факс +7-3822-606444, e-mail: tpu@tpu.ru, tpu.ru
ОКПО 02069303, ОГРН 1027000890168,
ИНН/КПП 7018007264/701701001, БИК 046902001

УТВЕРЖДАЮ
Директор ИИШНКБ НИ ТПУ,
 Г.Ф. Баранов
« _____ » _____ 2022 г.



Акт

внедрения результатов диссертационной работы

Васильева Ивана Михайловича

Комиссия в составе:

председатель: исполняющий обязанности заведующего кафедрой – руководитель отделения электронной инженерии, к.т.н., Тригуб М.В., члены комиссии: доцент отделения электронной инженерии, Сорокин П.В., доцент отделения электронной инженерии, к.т.н. Костина М.А. составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Васильева Ивана Михайловича «ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОПРОВОДЯЩЕЙ ПАСТЫ (ТЕРМОИНТЕРФЕЙСА)», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды, используются в учебном процессе отделения электронной инженерии инженерной школы неразрушающего контроля и безопасности национального исследовательского Томского политехнического университета в методических материалах дисциплины «Электронные промышленные устройства», а также при подготовке магистерских диссертаций и курсовых проектов студентами ТПУ.

Председатель комиссии



М.В. Тригуб

Члены комиссии



П.В. Сорокин

М.А. Костина