

МЕТОД ТЕРМОЗАЩИТЫ ПРИЕМО-ПЕРЕДАЮЩЕГО МОДУЛЯ

А.Д.Иванов

METHOD OF THERMAL PROTECTION OF THE RECEIVING AND TRANSMITTING MODULE

A.D.Ivanov

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, antonio15@mail.ru

Современные активные фазированные антенные решетки имеют высокую плотность упаковки приемо-передающих модулей, численность которых может достигать нескольких тысяч элементов в зависимости от решаемых задач. При работе всей системы КПД приемо-передающего модуля составляет порядка 20–30%. В результате высокой плотности упаковки элементов активных фазированных антенных решеток выделяется большое количество теплоты, которая должна быть рассеяна. Традиционное охлаждение воздухом из-за низкой эффективности используется только в системах длинноволнового диапазона. Большинство современных активных фазированных антенных решеток охлаждаются жидкостью, а также при помощи организации теплоотвода тепловыми трубками. В статье продемонстрирован метод термозащиты, позволяющий повысить надежность приемо-передающего модуля. Также представлены результаты работы термозащиты.

Ключевые слова: защита от перегрева, термоключ, приемо-передающий модуль

Для цитирования: Иванов А.Д. Метод термозащиты приемо-передающего модуля // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2022. №3(128). С.58–63. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2022.3\(128\).58-63](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2022.3(128).58-63)

Modern active phased antenna arrays (APAA) have a high packing density of receiving and transmitting modules (RTMs), the number of which can reach several thousand elements, depending on the tasks being solved. When the entire system is operating, the efficiency of the RTM is about 20–30%. As a result of the high packing density of the APAA elements, a large amount of heat is released, which must be dissipated. Due to low efficiency, traditional air cooling is used only in long-wave systems. Most modern active phased array antennas are cooled by liquid, as well as by organizing heat removal with the use of heat pipes. The article presents a method of thermal protection that allows to increase the reliability of the RTM. The results of thermal protection functioning are included.

Keywords: thermal protection, thermal key, receiving and transmitting module

For citation: Ivanov A.D. Method of thermal protection of the receiving and transmitting module // Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences. 2022. №3(128). P.58–63. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2022.3\(128\).58-63](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2022.3(128).58-63)

Введение

Проектирование активных фазированных антенных решеток (АФАР) производится по принципу формирования блоков из отдельных составляющих (приемо-передающих модулей — ППМ). Современные технологии микроэлектроники позволяют минимизировать габариты блоков и увеличить мощности ППМ. Одновременно с этим возникают проблемы, поскольку довольно плотная компоновка элементов влечет повышенную тепловую нагрузку на модули АФАР, а также зависимость от температуры ее характеристик.

Чувствительность элементов ППМ к изменению температуры привела к разработке различных схем температурной коррекции, обеспечивающих поддержание требуемых значений параметров АФАР. В работе [1] показана схема температурной коррекции параметров сложно-функциональных монолитных интегральных схем на основе интегрального датчика температуры, дополнительных корректирующих управляемых фазовращателей и управляемого аттенюатора. Схема температурной коррекции обеспечивает стабильность параметров ППМ в широком диапазоне рабочих температур. Она обладает достаточно высокой точностью срабатывания, но из-за большого количества используемых элементов имеет сложность в разработке и компоновке.

При этом цифровая составляющая подвержена шумовым колебаниям, а значит, сбоям в работе.

Применение различных систем жидкостного охлаждения и современных хладагентов позволяет снизить риски перегрева системы АФАР, но решить кардинально проблему не представляется возможным. Предотвращение выхода ППМ из строя из-за перегрева возможно только при его своевременном отключении, что ухудшает характеристики АФАР [2]. Именно поэтому разработка дополнительной термозащиты, способной вовремя сигнализировать о значительном перегреве ППМ и в нужный момент его отключить, оказывается весьма актуальной.

1. Анализ теплонагруженности приемо-передающих модулей АФАР

Активные фазированные антенные решетки — это совокупность (полотно) приемо-передающих модулей (ППМ), образующих матрицу (не обязательно прямоугольную) из строк и столбцов в плоскости, перпендикулярной направлению условного электронного луча. Главная идея АФАР — производить при передаче и приеме сигнала широкоугольное сканирование пространства не за счет механического перемещения радара, а с помощью фазированного управления лучом каждого элемента матрицы, каждого ППМ.

В зависимости от характеристик конструктивных данных блоков различается только количеством приемо-передающих модулей. В остальном конструкция имеет единый характер. Модульный принцип построения активных фазированных антенных решеток обеспечивает достижение жестких тактико-технических требований при сокращении массогабаритных характеристик.

В настоящее время наиболее перспективными считаются 32-канальные ППМ. Преимущество таких блоков заключается в оптимальном количестве каналов и их сочетании в более мощные блоки. Рассеиваемая мощность составляет порядка 1 кВт энергии. Компоновка комплектующих в блоке имеет оптимальный характер.

Каждый ППМ состоит из двух плат субмодулей, включающих по 16 приемо-передающих каналов (ППК). Два субмодуля, смонтированные зеркально на едином металлическом основании, конструктивно составляют единый 32-канальный ППМ. В состав ППМ кроме 32 ППК входят 8 преобразователей напряжения DC/DC, 4 микросхемы контроллера системы управления и 2 — формирования луча.

Основание приемо-передающего модуля служит для крепления субмодулей и одновременно исполняет роль радиатора с целью отвода выделяющегося тепла. Здесь же расположены трубки с охлаждающей жидкостью.

Система питания представляет собой параллельно установленные DC/DC источники вторичного электропитания. Каждый источник питает 4 ППМ. Примерная мощность источника составля-

ет 350 Вт. Подключение источников между собой возможно в режиме синхронизации. Частота работы составляет порядка 500 кГц. Входное напряжение находится в пределах 300 В, ток в импульсном режиме равен 40 А. Каждый из источников имеет защиту от короткого замыкания, от перенапряжения и от пониженного напряжения. КПД составляет 80%. Одним из важных показателей является герметичность и долгий срок службы при различных климатических параметрах.

Система управления имеет два основных процессора, которые контролируют 16 ППК. Кроме основных систем, присутствуют сторонние драйверы для корректировки напряжения процессоров источников питания и ППМ.

На рис.1 представлена структурная схема приемо-передающего модуля на 32 канала.

Увеличение количества каналов приемо-передающего модуля влечет за собой рост тепловой мощности. С учетом значения мощности, равного 100 Вт на канал, значение общей мощности от 4 до 32 каналов возрастает в 8 раз.

Плотная упаковка электронных компонентов ППМ при значительной выходной мощности приводит к тепловой нагруженности АФАР.

Тепловой расчет ППМ, проведенный с помощью программной системы моделирования ANSYS, показывает достаточно реальные значения температур рабочего приемо-передающего модуля. На рис.2 представлена модель блока ППМ с показателями значения температуры на корпусе при различных давлениях воды.

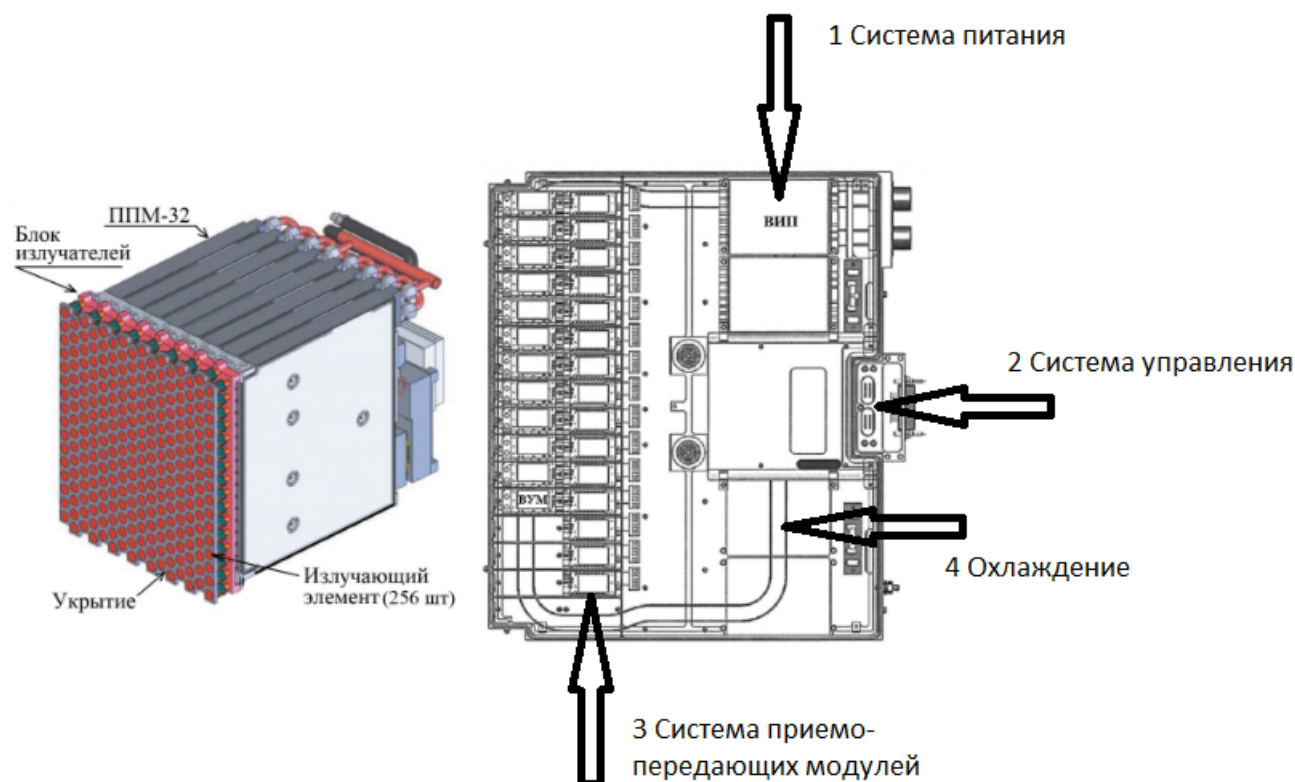


Рис.1. Структурная схема 32-канального приемо-передающего модуля

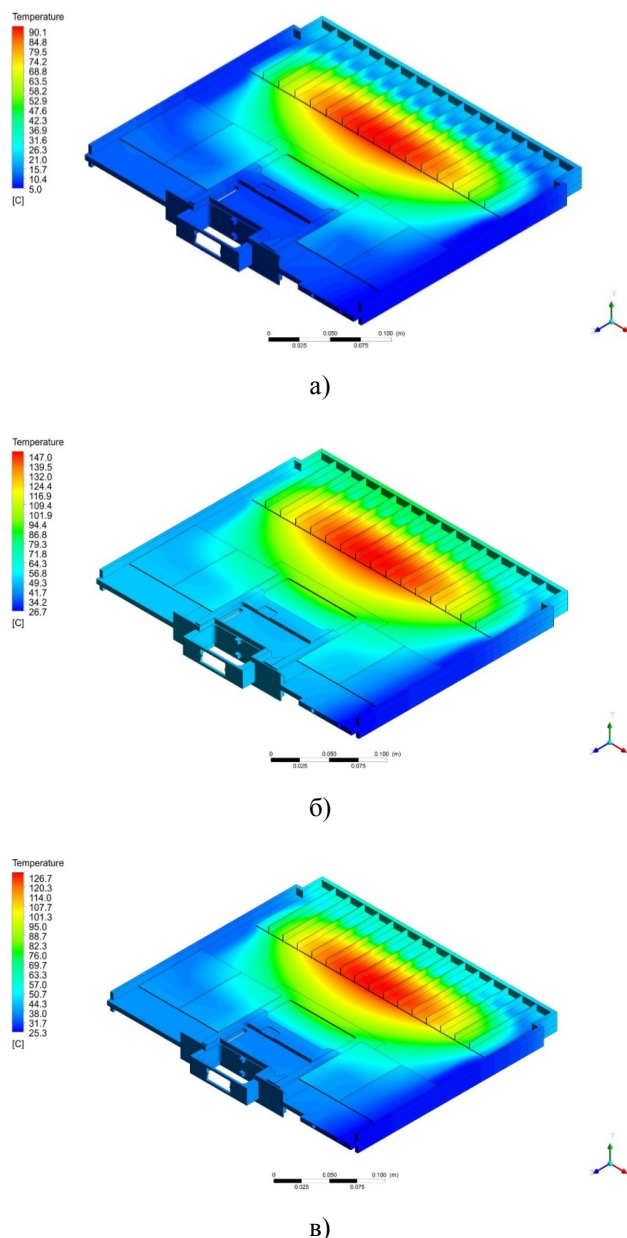


Рис.2. Тепловая модель блока ППМ при различных значениях температуры на корпусе и давлениях охлаждающей жидкости: а) температура жидкости 5°C, давление 7,5 литров в минуту; б) температура жидкости 25°C, давление 1,5 литра в минуту; в) температура жидкости 25°C, давление 3 литра в минуту

Наиболее теплонагруженным местом в блоке ППМ являются ячейки приемо-передающего тракта. Мощность, выделяемая одним трактом, равна примерно 60 Вт. Общая импульсная мощность составляет 1900 Вт. Из этих значений можно увидеть, что температура корпуса под приемо-передающими трактами доходит до 100°C.

Из полученных данных моделей видно, что в зависимости от охлаждающей жидкости и ее давления происходит изменение значения температуры на корпусе. При этом даже достаточно высокое давление и выбор жидкости типа этиленгликоля не дает отличных результатов в охлаждении блока приемо-передающего модуля.

2. Влияние тепловой перегрузки на приемо-передающий модуль

Наиболее теплонагруженными компонентами приемо-передающего модуля являются тракты приема и передачи, поскольку именно они имеют самую высокую температуру и в импульсном режиме, и при средней мощности. Выход из строя каждого из них влияет на диаграмму направленности всей АФАР.

Оценка ухудшения характеристик диаграммы направленности антенны (ДНА) при выходе из строя части каналов АФАР возможна с использованием интегрированной системы проектирования высокочастотных схем, а также антенных фазированных решеток NIAWR. Данный программный инструмент позволяет спроектировать АФАР любой конфигурации и с заданными характеристиками, а также в реальном времени отследить изменение ДНА при выходе из строя того или иного канала АФАР.

Исследования проводились на модели антенной решетки, имеющей следующие характеристики: частота — 2,4 ГГц, количество элементов — 64 шт., мощность одного элемента — 0,1 Вт. На рис.3 представлена диаграмма направленности данной антенны.

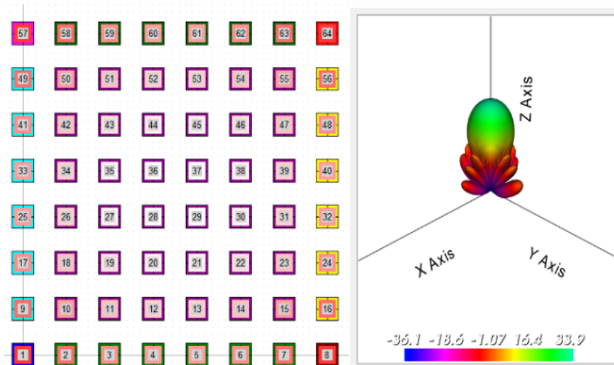


Рис.3. Диаграмма направленности АФАР 8×8

При отключении (выходе из строя) приемо-передающего тракта диаграмма направленности антенной решетки будет изменяться. Наибольшим изменениям подвержены боковые лепестки. Также наблюдается расширение главного лепестка. При реальной работе АФАР это изменение влечет обнаружением ложных целей. На рис.4 представлено изменение ДНА при отключении боковых приемо-передающих трактов (выделены серым с перечеркиванием крест на крест).

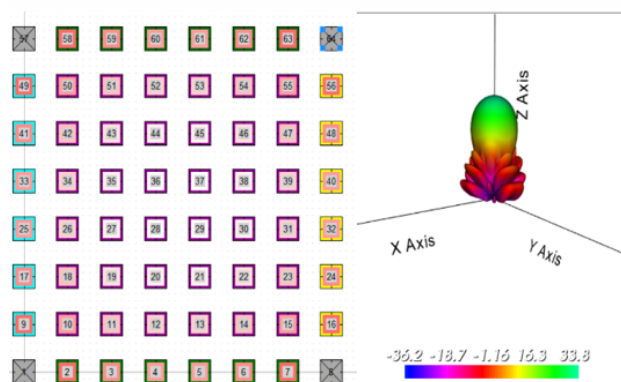


Рис.4. Изменение ДНА при отключении боковых ППК

Достаточно сильное изменение диаграммы направленности антенны происходит при отключении внутренних ППК (рис.5).

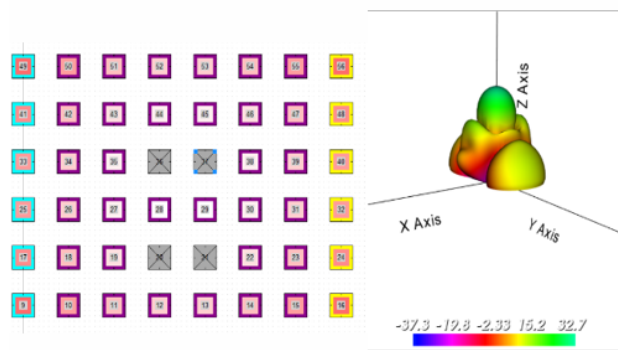


Рис.5. Изменение ДНА при отключении внутренних ППК

На рис.6 представлена диаграмма направленности модели АФАР 8×8 при различном процентном отключении ППК.

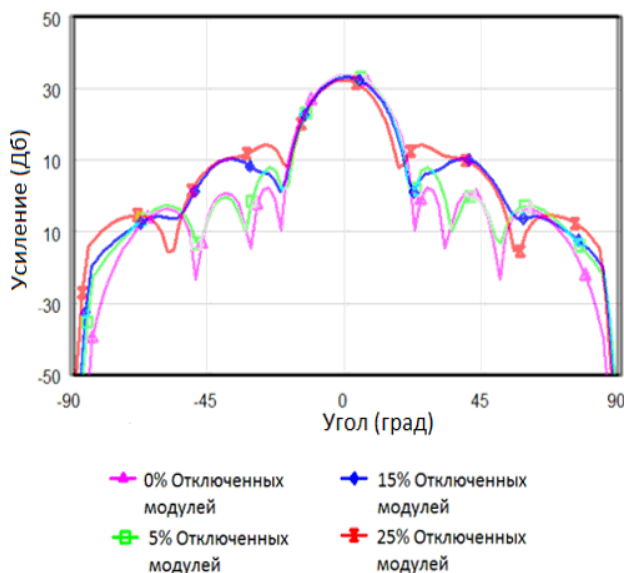


Рис.6. ДНА при различном процентном отключении ППК

Моделирование показало, что при отключении элементов АФАР главный и побочные лепестки диаграммы направленности расплываются, а значит, снижается дальность обнаружения целей. При отключении (перегреве) внутренних модулей АФАР изменение диаграммы направленности носит другой характер.

По результатам исследования модели можно сделать вывод о том, что при выходе из строя внешних модулей АФАР наиболее сильно страдает главный лепесток диаграммы направленности. При выходе из строя внутренних модулей изменению подвергаются боковые лепестки. Данная модель позволяет предопределить, насколько сильно произойдет изменение ДНА при выходе из строя того или иного модуля АФАР, а также получить численное значение изменения.

При отключении случайных модулей ППМ, в зависимости от процента выхода из строя, наиболее сильно страдают боковые лепестки ДНА. При отключении 16 из 64 модулей повышение уровня боковых лепестков составляет порядка 20 дБ. Изменение главного лепестка не превышает 5 дБ.

3. Представление и описание модели метода термозащиты

Описываемое схмотехническое решение метода термозащиты позволяет унифицировать его при использовании для защиты любых электронных устройств. Установка модуля производится в приемно-передающий тракт как компонент, имеющий наибольшую температуру в ППМ. В системе предусмотрена возможность установить значение температуры, при котором происходит отключение приемно-передающего тракта и последующее ожидание его включения. Такое решение позволяет системе управления ППМ следить за каждым каналом в отдельности и проводить перезагрузку канала в зависимости от его рабочего состояния.

Предлагаемый метод термозащиты основан на измерении значения тока, изменяющегося в зависимости от температуры. На рис.7 представлена структурная схема термозащиты. Схема делится на семь основных блоков. Реализация питания возможна как извне, так и непосредственно от системы питания ППМ.

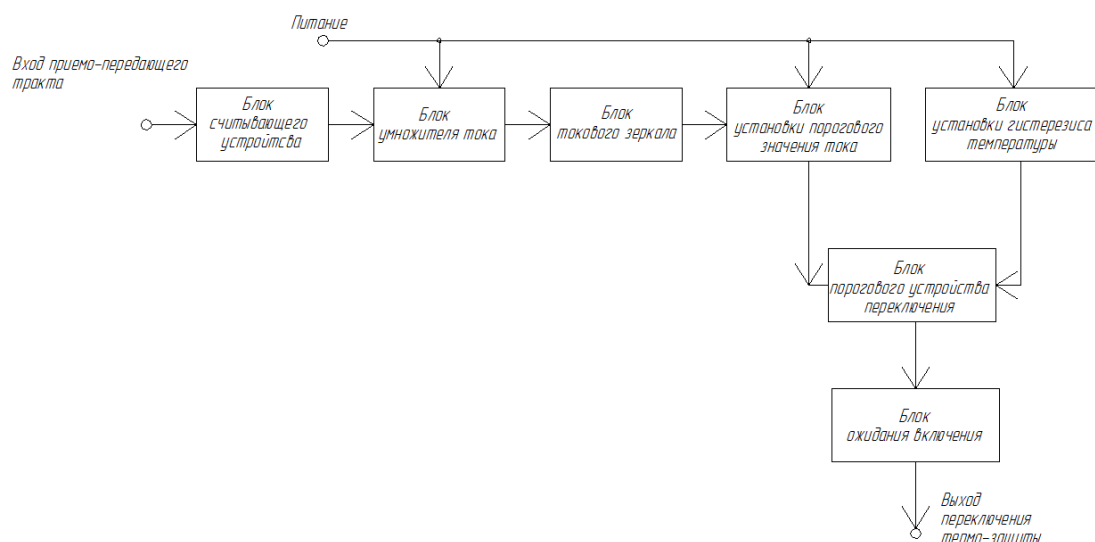


Рис.7. Структурная схема термозащиты

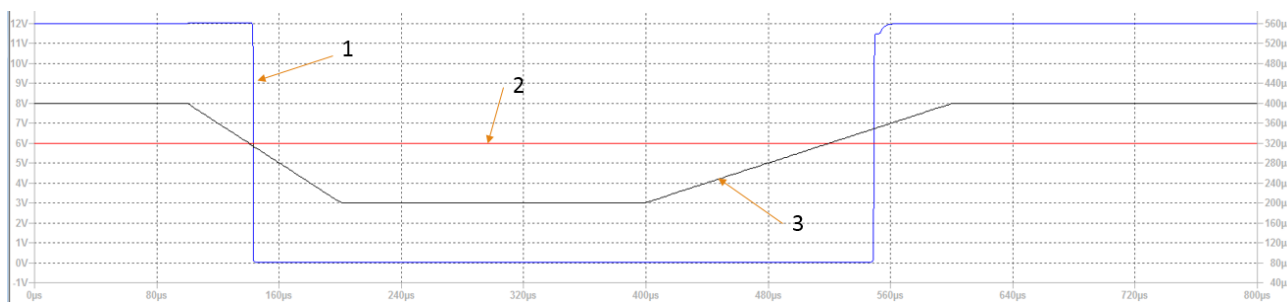


Рис.8. График работы модели схемы термозащиты: 1 — выходное напряжение; 2 — пороговое значение тока; 3 — изменение значение тока пропорционально температуре приемо-передающего тракта

Термокомпенсированный источник тока позволяет установить требуемое значение тока, которое останется постоянным при изменении температуры. Данное свойство схемы необходимо для устранения эффекта Эрли [3], поскольку при увеличении температуры происходит рост значения тока. При этом $U_{\text{бэ}}$ транзистора, установленного в блок порогового значения тока, уменьшается на $2,1 \text{ мВ/}^{\circ}\text{C}$. Установка второго транзистора в данный блок позволяет скомпенсировать этот эффект и снизить рост тока в зависимости от температуры.

Блок установки гистерезиса температуры реализуется аналогично блоку установки порогового значения тока. Смещение температуры позволяет устанавливать точку, при которой произойдет отключение устройства, что дает возможность устранить превышение критической температуры.

Блоком порогового устройства переключения является стандартный биполярный транзистор, при его переключении происходит включение или отключение устройства.

Блок считывающего устройства реализован путем помещения на поверхность максимального нагрева высоколегированных диодов, благодаря чему присутствует возможность преобразования значения температуры в конкретное значение тока.

Питание подается от источника питания или непосредственно от устройства. Одним из существенных преимуществ данной схемы является ее помехоустойчивость. В отличие от стандартных цифровых схем данное преимущество достигается за счет работы схемы по току вместо работы по напряжению. Применение источника тока в качестве установки гистерезиса температуры позволяет расширить возможности использования данного схемотехнического решения.

Диапазон рабочих температур — от 0 до 105°C . Погрешность измерения температуры составляет порядка 2% .

4. Результаты моделирования работы схемы термозащиты

Для выбора временных значений работы схемы было проведено моделирование ее работы в среде LTspice.

На рис.8 представлен график работы модели схемы термозащиты.

Проанализировав график работы модели термозащиты, можно сделать вывод, что, задавая

пороговое значение тока (в данной модели значение тока установлено порядка 195 мкА , что соответствует 80°C) относительно которого будет происходить переключение термозащиты, нужно понимать, какое значение температуры для этого требуется. Значение температуры прямо пропорционально значению тока.

Фронт переключения имеет неравные временные значения. Это зависит от компонентов, которые используются в схеме, а также от работы модели в системе LTSpice. Зачастую программные методы обработки сложных схем могут допускать ошибки при симуляции и расчете. Из-за таких неточностей требуется макетировать устройства и проверять их режимы работы с реальными компонентами.

Результаты работы модели показывают работоспособность данной термозащиты.

5. Результаты исследования работы макета метода термозащиты

Разрабатываемый макет термозащиты реализуется на основе модели, которая показала работоспособность данного метода. Основой макета является печатная плата, на которую устанавливаются компоненты по схеме.

На рис.9 представлена осциллограмма работы макета термозащиты. На ней показано изменение напряжения с 12 до 0 В . Данное изменение характеризует включение термозащиты при превышении температуры работы. Значение тока при этом равно 175 мкА , что равно температуре порядка $+80^{\circ}\text{C}$.

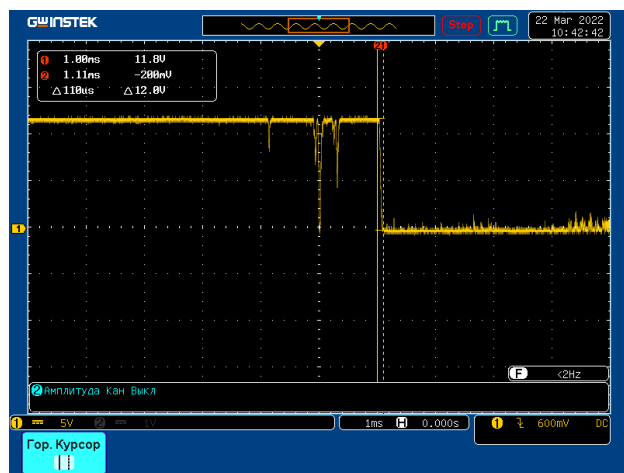


Рис.9. Осциллограмма включения макета термозащиты

На данной осциллограмме (рис.10) представлено отключение термозащиты. Значение тока отключения равно 195 мкА. Разница между значениями тока включения и отключения равна 20 мкА, что равно значению гистерезиса 10°C. Время отключения составляет порядка 20 мкс.

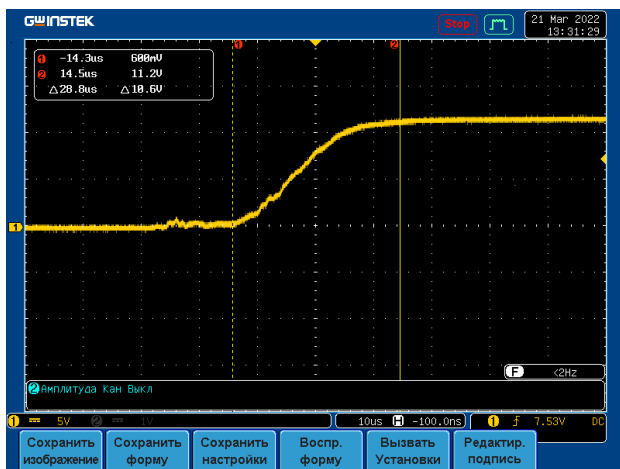


Рис.10. Осциллограмма выключения макета термозащиты

Разработанный макет термозащиты имеет работоспособность в диапазоне температур от 0 до 105°C. Погрешность измерения составляет $\pm 2^\circ\text{C}$. Применение данной системы позволяет увеличить

коэффициент надежности приемо-передающего модуля на 2,9%, а также увеличить ремонтпригодность.

1. Филипов И.Ф., Кравченко И.В., Снегур Д.А. и др. Исследование и разработка интегральных приемо-передающих модулей АФАР // Наноиндустрия. 2019. №S(89). С.404–414. DOI: <https://doi.org/10.22184/NanoRus.2019.12.89.404.414>
2. Иванов А.Д. Исследование влияния тепловой перегрузки на АФАР // Инфокоммуникационные технологии в цифровом мире: сб. докл. 11-й науч.-техн. шк.-семинара. Санкт-Петербург, 8–10 декабря 2021 г. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2021. С.61–63.
3. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники / Пер. с англ. Изд. 2-е. М.: БИНОМ. 2014. 704 с.

References

1. Filipov I.F., Kravchenko I.V., Snegur D.A. et al. Issledovaniye i razrabotka integral'nykh priyemoperedayushchikh moduley AFAR [Research and development of integral transceiver APAA modules]. Nanoindustriya — Nanoindustry, 2019, no. S(89), pp. 404–414. doi: <https://doi.org/10.22184/NanoRus.2019.12.89.404.414>
2. Ivanov A.D. Issledovaniye vliyaniya teplovoy peregruzki na AFAR [Study of the effect of thermal overload on APAA] Infokommunikatsionnyye tekhnologii v tsifrovom mire: sb. dokl. 11-y nauch.-tekhn. shk.-seminara [Infocommunication technologies in the digital world: coll. of reports of the 11th scientific and technical school-seminar]. St. Petersburg, ETU “LETI” Publ., 2021, p. 61–63.
3. Horowitz P., Hill W. The Art of Electronics. 2nd ed. (Russ. ed.: Iskusstvo skhemotekhniki. Izd. 2. Moscow, BINOM Publ., 2014. 704 p.).