

БЫСТРЫЙ СУБОПТИМАЛЬНЫЙ СПОСОБ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТАКТОВОЙ И ЦИКЛОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ ПРИ НЕКОГЕРЕНТНОЙ ДЕМОДУЛЯЦИИ ЧАСТОТНО-МАНИПУЛИРОВАННОГО СИГНАЛА С НЕПРЕРЫВНОЙ ФАЗОЙ

ность построения сети заданной конфигурации из имеющихся базовых компонентов (компьютеров, контроллеров, первичных преобразователей, каналов связи, сетевого оборудования, хранилищ данных и т.д.), обладающих заданными характеристиками. В построенной имитационной системе моделируется переключение между различными профилями потока запросов. Реализованы средства вывода и обработки статистической информации о результатах работы системы. На основе собранных статистических данных исследуются:

- общая производительность системы;
- потери на переходных процессах вариацией алгоритмов управления;
- размеры и структура кешей;
- задержки, возникающие в системе при ее работе в обычном (стационарном) режиме и при возникновении нештатных ситуаций;
- характеристики системы: длины очередей заявок; соотношение числа обслуженных требований и времени обслуживания требования; число событий, обслуженных без очереди и т.д. – в зависимости от числа узлов в сети, числа уровней в архитектуре и конфигурации сети; характеристик сети в зависимости от выбранного для реализации вида СМО диспетчеров системы и устройств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Емельянов, В. Имитационное моделирование систем / В.В.Емельянов, С.И.Ясиновский. – М.: Издательство МГТУ им. Баумана, 2009 – 583 с.
2. Анашкин, А. Техническое и программное обеспечение распределенных систем управления./А.С. Анашкин, Э.Д. Кадыров, В.Г. Хазаров. под ред проф. В.Г. Хазарова – СПб.: П-2, 2004 – 368с.
3. Рыжиков, Ю. Имитационное моделирование: Теория и технологии / Ю.И. Рыжиков. - Киев: Альтекс, 2004. – 384с.
4. Бахарова, Н. Анализ производительности сетевых структур методами теории массового обслуживания. / Н.Ф.Бахарова // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2009 – №3(80). – С. 25-34.
5. Гнеденко, Б. Введение в теорию массового обслуживания. / Б.В. Гнеденко, И.Н. Коваленко – М.: ЛКИ, 2007 - 400 с
6. Таненбаум, Э. Современные операционные системы. 2-е изд.. / Э. Таненбаум - СПб: Питер, 2002. - 1040 с.
7. Таненбаум, Э. Архитектура компьютера. / Э. Таненбаум - СПб: Питер, 2007. - 848 с.

Аспирант Е.В. Бочкарева – 22bev@mail.ru; к.т.н., проф. Л.И. Сучкова – lis@agtu.secna.ru; аспирант А.И. Харламов – aharlamov@gmail.ru; д.т.н., проф. А.Г. Якунин - (385-2) 29-07-86 - Алтайский Государственный технический университет, кафедра вычислительных систем и информационной безопасности.

УДК 004.318-181.4:681.51

БЫСТРЫЙ СУБОПТИМАЛЬНЫЙ СПОСОБ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТАКТОВОЙ И ЦИКЛОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ ПРИ НЕКОГЕРЕНТНОЙ ДЕМОДУЛЯЦИИ ЧАСТОТНО-МАНИПУЛИРОВАННОГО СИГНАЛА С НЕПРЕРЫВНОЙ ФАЗОЙ

В.В. Василевский

Проанализированы свойства способа восстановления тактовой синхронизации для частотно-манипулированных сигналов с непрерывной фазой путем поиска максимума раскрытия глазковой диаграммы по ограниченному набору отсчетов сигнала на выходе частотного дискриминатора [1]. Получены зависимости вероятности ошибок первого, второго рода и суммарной вероятности ошибки, графики функций распределения вероятности для различных отношений сигнал/шум (ОСШ). Произведено сравнение эффективности способа для синхропосылок разной длины и типа, произведено сравнение способа с оптимальным некогерентным обнаружителем, сделаны выводы и рекомендации по применению.

Ключевые слова: частотная манипуляция с непрерывной фазой, восстановление, синхронизации, тактовая синхронизация, цикловая синхронизация.

При построении многоканального цифрового радиоприемного устройства дискретных сообщений важной частью является реализация системы восстановления синхрони-

зации [2]. При некогерентном приеме необходимо восстановление следующих видов синхронизации: тактовой (символьной), цикловой (кадровой) и частотной [3].

РАЗДЕЛ I. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ СИНТЕЗА И АНАЛИЗА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Восстановление частотной синхронизации между приемником и передатчиком - необходимое условие для обеспечения возможности правильной работы остальных систем: автоматической регулировки усиления, демодулятора, восстановления других видов синхронизации. Для многоканальных систем с множеством асинхронных передатчиков с высокой нестабильностью центральных частот восстановление частотной синхронизации с каждым передатчиком выполняется путем оценки спектра широкополосного сигнала и поиска максимумов спектральных составляющих. Точность восстановления частоты при этом зависит от способа оценки спектра и его параметров, а также длины реализации и параметров сигнала.

Восстановление тактовой и цикловой синхронизации необходимо для правильного извлечения информации из принятого сигнала. Восстановление тактовой синхронизации это процесс нахождения наилучшего момента времени взятия выборки, который соответствует максимальному раскрытию глазковой диаграммы принимаемого сигнала [4]. Все способы восстановления тактовой синхронизации можно разделить на два класса: с использованием данных и без использования данных [3]. В статье [1] описан способ (с использованием данных) восстановления тактовой синхронизации для частотной модуляции с непрерывной фазой (**ЧМНФ**) путем поиска максимума раскрытия глазковой диаграммы по ограниченному набору отсчетов сигнала на выходе частотного дискриминатора. Так как в способе используется синхропосылка, то одновременно происходит восстановление цикловой синхронизации. Актуальность работы подтверждается высокой потребностью в разработке быстрых субоптимальных способов приема и обработки спектрально эффективных видов цифровых модуляций.

Постановка задачи

Цели настоящей работы: проанализировать свойства способа [1], получить оценки вероятностных характеристик способа по результатам численного моделирования, определить критерии выбора оптимального порога для различных отношений сигнал/шум (ОСШ) на входе частотного детектора и уровней допустимой ошибки, сравнить эффективность способа для синхропосылок разной длины и типа, сравнить способ с оптимальным некогерентным обнаружителем.

Описание способа

Способ восстановления тактовой и цикловой синхронизации относится к классу способов с использованием данных, поэтому при формировании сигнала к информационному сообщению добавляется синхропосылка в виде заголовка [1]. Для простоты здесь и далее под сигналом подразумевается дискретный квантованный сигнал, соответственно все составные части и узлы имеют дискретный характер.

Система восстановления синхронизации, как показано на рисунке 1, состоит из опорного генератора (ОГ), смесителя (СМ), который переносит входной сигнал на низкую промежуточную или нулевую частоту, частотного детектора (ЧД), вычислителя и порогового устройства (ПУ).

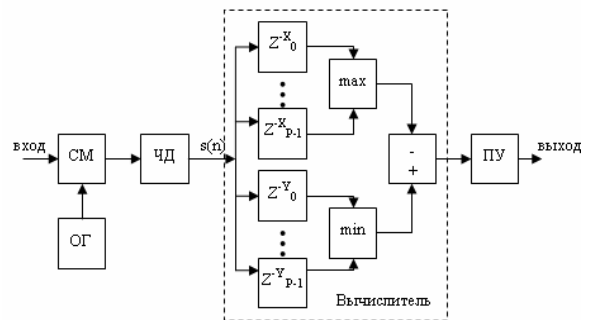


Рисунок 1 - Структурная схема способа восстановления синхронизации

Разрешающий сигнал на выходе ПУ используется для синхронизации тактового генератора приемника. Частота дискретизации входного сигнала должна превышать в M раз тактовую частоту, чем выше M , тем меньшую погрешность может обеспечить способ восстановления синхронизации. Номер k выборки, соответствующей максимальному раскрытию глазковой диаграммы сигнала $s(n)$ на выходе ЧД определяется по формуле:

$$k = \arg \max E(n), \text{ при } E(n) \geq h \quad (1)$$

$$E(n) = \min Y - \max X \quad (2)$$

где $E(n)$ - значение раскрытия глазковой диаграммы сигнала на выходе ЧД, h - пороговый уровень.

Векторы X и Y содержат по P отсчетов сигнала на выходе ЧД, выбор которых определяется видом синхропосылки и соответствуют выборкам логического нуля и логической единицы соответственно. Например, для синхропосылки в двоичном коде 10110010b (в шестнадцатеричном коде B2h) длиной $N = 8$ бит при $M = 8$ [1]:

**БЫСТРЫЙ СУБОПТИМАЛЬНЫЙ СПОСОБ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТАКТОВОЙ И ЦИКЛОВОЙ
СИНХРОНИЗАЦИИ ПРИ НЕКОГЕРЕНТНОЙ ДЕМОДУЛЯЦИИ ЧАСТОТНО-МАНИПУЛИРОВАННОГО
СИГНАЛА С НЕПРЕРЫВНОЙ ФАЗОЙ**

$$X = [s(n) s(n-16) s(n-20) s(n-24) s(n-48)], \quad (3)$$

$$Y = [s(n-8) s(n-32) s(n-36) s(n-40) s(n-64)] \quad (4)$$

Сигнал $s(n)$ на выходе ЧД для этого случая показан на рисунке 2.

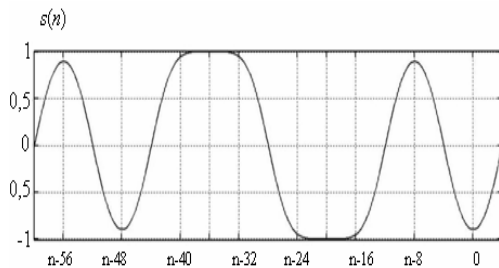


Рисунок 2 - Сигнал на выходе ЧД, синхросылка 10110010b (B2h), N = 8 бит, при M = 8

Для вычисления по формуле (2) в данном случае требуется 8 операций сравнения, 10 операций пересылки и одно вычитание. При этом в случае использования оптимального некогерентного обнаружителя потребуется вычисление операции свертки для каждого отсчета синхросылки, то есть 64 операции умножения с накоплением [7].

Таким образом, при вычислении на сигнальном процессоре, который обеспечивает выполнение операции умножения с накоплением за один такт, исследуемый способ требует в 3 раза меньшее количество операций. При использовании микроконтроллеров общего назначения исследуемый способ имеет выигрыш по вычислительным затратам примерно в 6 раз, в связи с тем, что операции умножения и сложения в микроконтроллерах выполняются отдельно.

Результаты анализа

Численное моделирование было выполнено в расширении Simulink математического пакета MATLAB.

Модель осуществляет формирование синхросылок, ЧМНФ модуляцию без разрыва фазы по схеме GFSK [5], обеспечивает прохождение сигнала через канал с аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ), фильтрацию с помощью принимающего фильтра, некогерентное частотное детектирование, вычисление максимума раскрытия глазковой диаграммы, принятие решения о наличии синхросылки в сигнале и выдачу тактовых импульсов синхронизации по результату этого решения.

В принимающем фильтре использовалась многоскоростная обработка сигнала [6] с многокаскадной КИХ-фильтрацией и понижением частоты дискретизации.

Некогерентное частотное детектирование производилось по квадратурной схеме [7], которая описывается выражением

$$s(n) = \frac{Q(n-1)I(n) - I(n-1)Q(n)}{I^2(n) + Q^2(n)}, \quad (5)$$

где $I(n)$ - синфазная составляющая, $Q(n)$ - квадратурная составляющая.

Первой задачей было получение вероятностных характеристик способа при использовании синхросылки B2h[1]. По результатам исследования были построены графики зависимости вероятностей ошибок первого Q_0 (ложный прием синхросылки) и второго Q_1 (пропуск синхросылки) рода от значения порога h , для различных соотношений сигнал/шум d на входе демодулятора (рисунок 3).

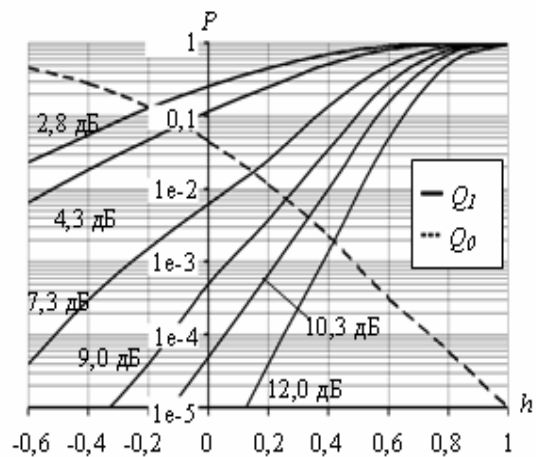


Рисунок 3 - Графики зависимости вероятности первого рода Q_0 и второго рода Q_1 от значения порогового уровня h

Значения порога h были пронормированы относительно максимального значения амплитуды на выходе схемы вычисления, которая равна удвоенной амплитуде с выхода демодулятора при приеме идеального сигнала без помех. Семейство кривых Q_0 и Q_1 получено для случая, когда максимальная ошибка момента тактовой синхронизации не превышает половины длительности двоичного символа T_b . Пользуясь графиками можно определить пороговый уровень по критерию Неймана-Пирсона [8], задав значение вероятности ложного приема, для определенного соотношения сигнал/шум.

В системах связи обычно не разделяют вероятности ошибок первого и второго рода [8], а используют полную вероятность ошибки $P_e = Q_0 + Q_1$ (рисунок 4).

РАЗДЕЛ I. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ СИНТЕЗА И АНАЛИЗА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

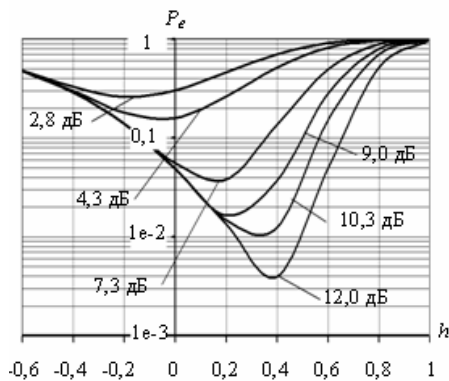


Рисунок 4 - Графики зависимости суммарной вероятности ошибки P_e от значения порогового уровня h

Оптимальное значение порога, при котором минимизируется ошибка ложного приема и ошибка пропуска синхросылки для заданного соотношения сигнал/шум d , определяется в точке минимума кривой P_e . Это значение соответствует решению задачи оптимального обнаружения с точки зрения критерия идеального наблюдателя (максимума апостериорной вероятности) [8]. Определив значение вероятности ошибки второго рода (при заданном пороге), можно определить вероятность правильного приема $Q_d = 1 - Q_1$.

На рисунке 5 приведены графики функции распределения вероятности F ошибки восстановления тактовой синхронизации ξ , которая выражается в процентах относительно длительности двоичного символа T_b . Задав максимально допустимое значение ошибки, по графику можно определить вероятность того, что она не превысит допустимого уровня, при определенном соотношении сигнал/шум d .

Значение вероятности ошибки второго рода Q_1 для заданного допустимого уровня ошибки F можно оценить по формуле

$$Q_1 = 1 - F + Q_1 \cdot F, \quad (6)$$

где Q_1 - вероятность ошибки второго рода по рисунку 3.

Также были исследованы синхросылки разной структуры и длины (рисунок 6) при соотношении сигнал/шум 7,3 дБ на входе ЧД: а) код Баркера 7 порядка, б) В2h, в) код Баркера 11 порядка, г) В2В2h, д) 3В28h, е) последовательное соединение кода Баркера 5 порядка и кода Баркера 11 порядка.

Коды Баркера были выбраны для исследования из-за хороших автокорреляционных свойств для последующего сравнения исследуемого способа с корреляционным. После-

довательное соединение кода Баркера 5 порядка и кода Баркера 11 порядка было выбрано для получения 16-ти битовой последовательности и проверки того, как изменятся характеристики составной синхросылки по сравнению с отдельными кодовыми словами.

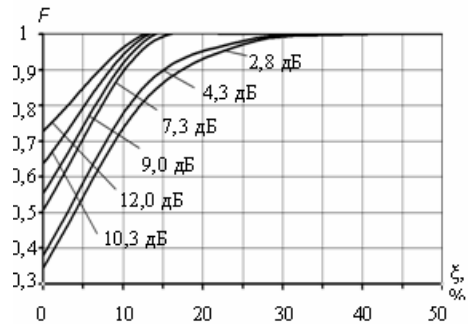


Рисунок 5 - Графики функций распределения вероятности F ошибки восстановления тактовой синхронизации ξ

По графикам на рисунок 6 можно сделать общий вывод, что по мере увеличения длины синхросылки уменьшается вероятность ложного обнаружения Q_0 , но при этом увеличивается вероятность пропуска сигнала Q_1 .

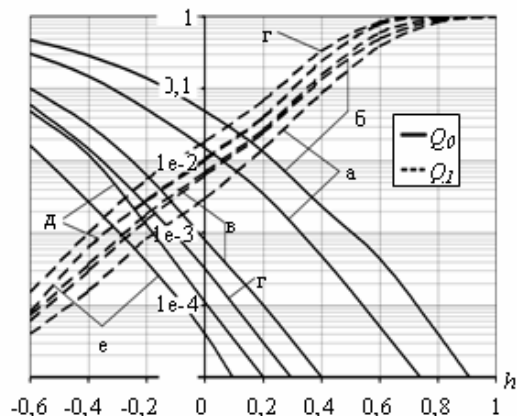


Рисунок 6 - Графики зависимости вероятности первого рода Q_0 и второго рода Q_1 от значения порогового уровня h для ОСШ 7,3 дБ: а) код Баркера 7 порядка, б) В2h, в) код Баркера 11 порядка, г) В2В2h, д) 3В28h, е) последовательное соединение кода Баркера 5 порядка и кода Баркера 11 порядка

При этом коды Баркера и их комбинация продемонстрировали наилучшие вероятностные характеристики по сравнению с остальными рассмотренными синхросылками близкой длины. В частности, с точки зрения критерия идеального наблюдателя (рисунок 7) наилучшим из кодов длиной 16 бит является

**БЫСТРЫЙ СУБОПТИМАЛЬНЫЙ СПОСОБ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТАКТОВОЙ И ЦИКЛОВОЙ
СИНХРОНИЗАЦИИ ПРИ НЕКОГЕРЕНТНОЙ ДЕМОДУЛЯЦИИ ЧАСТОТНО-МАНИПУЛИРОВАННОГО
СИГНАЛА С НЕПРЕРЫВНОЙ ФАЗОЙ**

ся последовательное соединение кода Баркера 5 порядка и кода Баркера 11 порядка. По суммарной вероятности P_e 16-битная синхросылка B2B2h оказалась хуже кода Баркера 11 порядка из-за большей вероятности пропуска сигнала Q1.

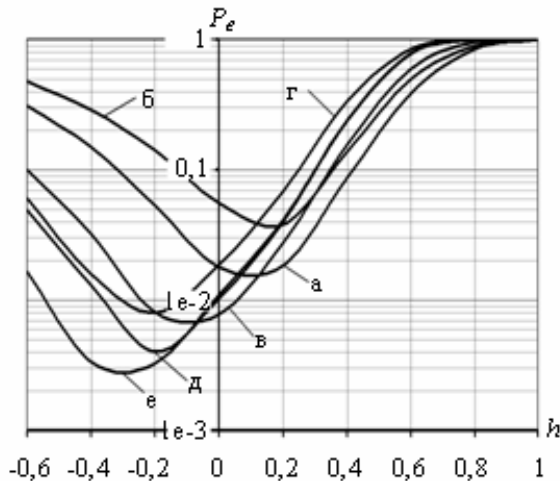


Рисунок 7 - Графики зависимости суммарной вероятности ошибки P_e от значения порогового уровня h для ОСШ 7,3 дБ: а) код Баркера 7 порядка, б) B2h, в) код Баркера 11 порядка, г) B2B2h, д) 3B28h, е) последовательное соединение кода Баркера 5 порядка и кода Баркера 11 порядка

На рисунке 8 показаны графики, позволяющие сравнить исследуемый способ с оптимальным некогерентным корреляционным обнаружителем. Видно, что последний обеспечивает меньшую суммарную вероятность пропуска сигнала P_e , однако при этом требует больших вычислительных затрат.

Кроме того, оптимальный обнаружитель чувствителен к величине ошибки восстановления частотной синхронизации, при этом для примера на рисунке 8 ошибка 1 Гц эквивалентна смещению рабочей точки вдоль оси h на 0,01425.

Так, при частотной ошибке 15 Гц (7,5% от ширины спектра сигнала по уровню -60 дБ), вероятность ошибки P_e оптимального обнаружителя становится приблизительно равна вероятности ошибки исследуемого способа. Для исследуемого способа из (1) и (2) видно, что порог h не зависит от центральной частоты сигнала на входе ЧД, а значит способ не чувствителен к наличию частотной ошибки.

Заключение

Были проанализированы свойства способа [1], получены зависимости вероятности ошибок первого, второго рода и суммарной вероятности ошибки, графики функций рас-

пределения вероятности для различных ОСШ.

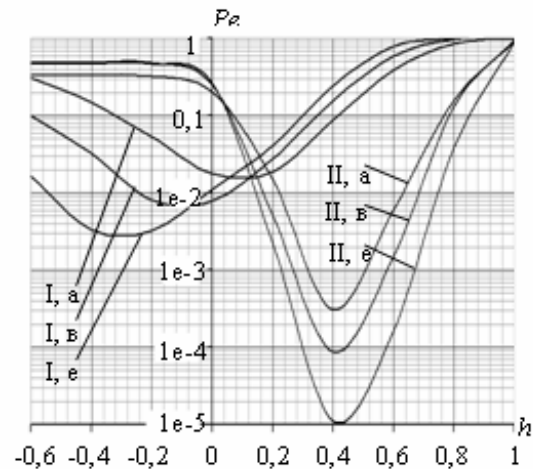


Рисунок 8 - Графики суммарной вероятности ошибки P_e в зависимости от значения порогового уровня h для ОСШ 7,3 дБ: (I) исследуемый способ, (II) оптимальный некогерентный обнаружитель, а) код Баркера 7 порядка, в) код Баркера 11 порядка, е) последовательное соединение кода Баркера 5 порядка и кода Баркера 11 порядка

По полученным графикам можно определить оптимальный порог h для различных ОСШ и уровней допустимой ошибки.

Было произведено сравнение эффективности способа для синхросылок разной длины и типа, произведено сравнение способа с оптимальным некогерентным обнаружителем.

Исследованный способ может применяться для восстановления тактовой и цикловой синхронизации в системах связи с частотной манипуляцией с непрерывной фазой. Достоинства способа заключаются в нечувствительности к ошибке восстановления частотной синхронизации (восстановления частоты несущей), что важно для недорогих изделий с высокой нестабильностью опорного генератора.

Высокая вычислительная эффективность способа позволяет применять его в приемных устройствах без использования дорогостоящих сигнальных процессоров. Исследований такого характера для рассмотренного способа в открытых печатных и электронных источниках обнаружено не было, что позволяет судить о новизне работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Spreadbury, D. Clock extraction [Электронный ресурс]. / D. Spreadbury. - Plextek Ltd.- Режим доступа: [http:// www.plextek.co.uk/papers/Clock%20Extraction.pdf](http://www.plextek.co.uk/papers/Clock%20Extraction.pdf).

РАЗДЕЛ I. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ СИНТЕЗА И АНАЛИЗА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

2. Прокис, Дж. Цифровая связь. / Дж. Прокис, Под ред. Д. Д. Кловского. – М.: Радио и связь, 2000.
3. Складар, Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение/ Б. Складар – М.: Вильямс, 2004.
4. Huajing, F., Ultra fast synchronized symbol timing recovery. // F.Huajing, K. Feher. Proc. of Int. Conf. on Consumer Electronics. -1995, P.156-157.
5. Феер, К. Беспроводная цифровая связь. / К. Феер Под ред. В.И. Журавлёва. -М.: Радио и связь, 2000.
6. Лайонс, Р. Цифровая обработка сигналов/ Р. Лайонс. -М.: Бином-Пресс, 2006.
7. Сергиенко, А.Б. Цифровая обработка сигналов./А.Б. Сергиенко -СПб.: Питер, 2006.
8. Шахтарин, Б.И. Обнаружение сигналов / Б.И. Шахтарин - М.: Гелиос АРВ, 2006.

М.н.с., аспирант Василевский В.В., тел. 8-960-990-1248, e-mail: altego@omgtu.ru, Омский государственный технический университет, НИЧ (г. Омск).

УДК: 621.362:537.322

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ХОЛОДИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ НА БАЗЕ СЛОИСТЫХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ БАТАРЕЙ С ТЕПЛОВЫМИ ТЕРМОСИФОНАМИ

Т.А. Исмаилов, О.В. Евдулов, Д.В. Евдулов

Рассмотрена математическая модель холодильной установки, выполненной на базе слоистых термоэлектрических батарей слоистой конструкции с тепловыми термосифонами. Приведены результаты численного эксперимента.

Ключевые слова: слоистая термоэлектрическая батарея, холодильная установка, тепловой термосифон, математическая модель, численный метод расчета, автоматизированная обработка информации

В настоящее время одной из тенденций развития термоэлектрической техники является переход к слаботочным термоэлектрическим батареям (ТЭБ), электрический ток питания которых не превышает 7-8 А. ТЭБ подобного типа строятся путем последовательного соединения большого количества термоэлементов (ТЭ) (до несколько сот штук), имеющих малую площадь поперечного сечения. Существующие слаботочные ТЭБ в случае использования их в большом количестве для конструирования достаточно мощных холодильных установок (мощностью несколько кВт) обладают недостаточной надежностью за счет роста числа ТЭ и, соответственно, паяных соединений, а также низкими термодинамическими характеристиками. Поэтому для проектирования подобных холодильных установок более целесообразным является использование сильноточных ТЭБ.

Вместе с тем при проектировании сильноточных ТЭБ на базе ТЭ классической П-образной конструкции на первое место выходит вопрос об их термомеханической надежности. В данном конструктивном исполнении ТЭ при увеличении значения тока питания, и, соответственно удельных тепловых потоков на его холодных и горячих спаях, резко возрастают термомеханические напряжения

вследствие теплового расширения (сужения) материалов, что во многом сказывается на надежности функционирования ТЭБ. В этих условиях необходимо принятие определенных конструктивных мер для снижения величины термомеханических напряжений.

В [1] для устранения механических напряжений вследствие теплового расширения (сжатия) материалов предложена слоистая ТЭБ, конструкция которой не является жесткой, вследствие чего возникающие в ней термомеханические напряжения могут быть устранены, либо значительно снижены.

В настоящей работе предлагается к рассмотрению математическая модель холодильной установки, выполненной на базе такой ТЭБ в сочетании с тепловыми термосифонами, дающими возможность дистанционно разделить источник холода и объект охлаждения. При этом задача делится на две составляющие: решение тепловой и термомеханической задачи для слоистого ТЭ и расчет теплового поля теплового термосифона.

Расчетная схема определения теплового поля в слоистом ТЭ приведена на рисунке 1. Области 1, 3 и 5 – коммутационные пластины. 2 и 4 – термоэлектрический материал.