

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт космических и информационных технологий
Кафедра «Системы автоматики, автоматизированное управление
и проектирование»

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ С.В. Ченцов
« ____ » _____ 2021 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

27.04.04 – Управление в технических системах

**СИСТЕМА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ АВТОНОМНОГО ОБЪЕКТА
НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ГЕОТЕРМАЛЬНОГО
ИСТОЧНИКА**

Руководитель	_____	___06.2021 г.	проф., д-р техн. наук Ю.В.Краснобаев
Выпускник	_____	___06.2021 г.	К.И.Чеботарев
Нормоконтролер	_____	___06.2021 г.	Т.А. Грудинова

Красноярск 2021

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Система электропитания автономного объекта на основе использования энергии геотермального источника» содержит 53 страниц текстового документа, 16 иллюстраций, 3 таблицы, 28 формул, 6 приложений, 15 использованных источников.

ТЕРМОЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОР, АВТОНОМНАЯ СИСТЕМА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ, ИОНИСТОР, ИМПУЛЬСНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ.

Цель данной работы дипломного проекта является выполнение проектных работ, предназначенных для создания автономной системы электропитания. Был решен ряд задач, а именно:

- 1) Изучены принцип действия и основные характеристики термоэлектрогенерирующих элементов, использующих эффект Зеебека;
- 2) Разработана структурная схема системы электропитания (СЭП);
- 3) Рассчитана максимальная и минимальная мощности, потребляемые нагрузкой;
- 4) Выбраны промышленные импульсные стабилизаторы напряжения, удовлетворяющие требованиям технического задания;
- 5) Выбран тип элементов для накопителя энергии (НЭ) и разработан накопитель энергии для СЭП;
- 6) Спроектирована схема ограничителя заряда НЭ, не выпускаемая промышленностью, и рассчитаны параметры элементов, входящих в нее.
- 7) Проведена проверка работоспособности СЭП в виртуальной среде.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
1 Описание проектируемой системы	7
1.1 Исходные данные для проектирования системы электропитания.....	7
1.2 Анализ технического задания.....	8
1.3 Расчёт усреднённых максимальной и минимальной мощностей источника энергии	10
1.4 Разработка структурной схемы системы электропитания.....	16
2 Выбор марки термоэлектрогенератора, расчёт их количества и способа соединения в батарею в источнике энергии	18
2.1 Расчет требуемого количества модулей термоэлектрогенераторов в составе батареи термоэлектрогенераторов.....	19
2.2 Построение мощностных характеристик источника энергии	26
2.3 Выбор типа аккумулирующих элементов для накопителя энергии и определение количества аккумулирующих элементов в составе накопителя энергии.....	28
2.4 Выбор марки импульсных стабилизированных преобразователей	36
3 Разработка схемы принципиальной ограничителя напряжения на накопителе энергии.....	39
3.1 Моделирование процессов в системе электропитания в режиме ограничения напряжения на накопителе энергии	41
Заключение	45
Список сокращений	46
Список использованных источников	47
Приложение А	49
Приложение Б.....	50

Приложение В	51
Приложение Г	52
Приложение Д	53
Приложение Е.....	54

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день, в связи с повсеместным внедрением электронных технологий в различных сферах жизнедеятельности человека, растет необходимая потребность в создании системы электроснабжения электронных устройств на базе автономного источника питания, то есть СЭП, которая не получает электроэнергию от промышленных источников питания.

Вопрос обеспечения электропитанием различных электронных устройств особенно важно в полевых условиях и условиях научных выездных экспедиций. В этих условиях практически никогда не найти различных линий электропередач, а транспортировка громоздких генераторов, работающих на жидком топливе, может оказаться невозможной из-за местности, погодных условий, ограниченного бюджета или отсутствия транспорта.

Также, на производстве зачастую возникает вопрос о дополнительном источнике питания для устройств, потребляющие малое количество энергии. Хотя такие устройства и потребляют небольшое количество энергии, но на производстве их может использоваться больше количество, например, датчики мониторинга систем и управления, сигнализация об опасности, камеры и передатчики систем наблюдения и т.д.

При таких обстоятельствах, когда отсутствует электроэнергия, самым рациональным решением является использование альтернативных источников энергии. Но, при этом, использование источников, которые вырабатывают энергию с помощью фотоэлектрических преобразователей, не всегда возможно, особенно в ночное время или в плохих погодных условиях, а также в различных северных регионах, где солнечный свет бывает крайне редко.

Вот почему термоэлектрические генераторы (ТЭГ) рассматриваются как источник энергии. Они менее прихотливы, в отличии от аналогов, и для

их работы требуется только наличие разницы температуры между охлаждаемой и нагреваемой сторонами термоэлектрических генерирующих элементов.

Учитывая вышеизложенное, актуальной задачей можно считать создание автономной системы электропитания, использующей термоэлектрические генераторы в качестве источников электроэнергии.

Цель работы: разработка автономной системы электропитания на основе энергии геотермального источника

Задачи:

а) Изучить принцип действия и основные характеристики термоэлектродгенерирующих элементов, использующих эффект Зеебека;

б) Разработать структурную схему автономной СЭП;

в) Рассчитать максимальную и минимальную мощности, потребляемые нагрузкой;

г) Выбрать промышленные термоэлектродгенерирующие элементы и импульсные стабилизаторы напряжения, удовлетворяющие требованиям технического задания;

д) Выбрать тип элементов для накопителя энергии и разработать накопитель энергии для СЭП;

е) Исходя из технического задания, разработать накопитель энергии, который отдает энергию во время потребления кратковременной пиковой нагрузки.

ж) Спроектировать схему ограничителя заряда НЭ и рассчитать параметры элементов, входящих в нее;

з) Провести проверку работоспособности СЭП в виртуальной среде.

1 Описание проектируемой системы

1.1 Исходные данные для проектирования системы электропитания

Необходимо выполнить работу по проектированию автономной системы электропитания (СЭП), у которой источником энергии является источник тепловой энергии с изменяющимися параметрами, а в качестве потребителей электрической энергии выступают три потребителя энергии постоянного тока с изменяющейся мощностью.

Исходные данные по источнику тепловой энергии и по параметрам потребителей энергии на выходе СЭП:

- 1) Максимальная температура источника тепла 95 °С
- 2) Минимальная температура источника тепла 90 °С
- 3) Максимальная температура окружающего воздуха 25 °С
- 4) Минимальная температура окружающего воздуха -25 °С
- 5) Напряжение на выходе 1 – 15,0 (В) +/- 10%
- 6) Напряжение на выходе 2 – 3.3 (В) +/- 10%
- 7) Напряжение на выходе 2 – 24 (В) +/- 10%
- 8) Мощность, потребляемая по выходу 1 максимальная – 2.5 Вт
- 9) Мощность, потребляемая по выходу 1 минимальная – 0,1Вт
- 10) Мощность, потребляемая по выходу 2 максимальная – 3.3 Вт
- 11) Мощность, потребляемая по выходу 2 минимальная – 0.2 Вт
- 12) Мощность, потребляемая по выходу 3 постоянная – 1 Вт
- 13) Мощность, потребляемая по выходу 3 импульсная – 32 Вт при длительности импульса – 10 с и периоде повторения – 1000 с.

1.2 Анализ технического задания

Проведём анализ технического задания. Для удобства, занесём параметры потребителей энергии в таблицу 1, а параметры температуры в таблицу 2.

Таблица 1 - Данные потребителей энергии

	Мощность потребляемая максимальная P_{\max} (Вт)	Мощность потребляемая минимальная P_{\min} (Вт)	Напряжение $U_{\text{номинал.}}$ (В)	Отклонение напряжения (%)
Нагрузка 1	3.5	0.1	15	5
Нагрузка 2	3.3	0.2	3.3	5
Нагрузка $3_{\text{текущая}}$	1.35	0.1	24	5
Нагрузка $3_{\text{импульс}}$	32	-	24	5

Таблица 2 – Данные температур окружающей среды и источника тепла

	Температура источника тепла $T_{\text{ист}}$	Температура окружающей среды $T_{\text{сред}}$
Минимальная (<i>min</i>)	90 °С	-25 °С
Максимальная (<i>max</i>)	95 °С	25 °С

Из анализа исходных данных (ТЗ) видно, что имеется три потребителя энергии, у которых высокие требования по стабильности выходного напряжения, так как процент отклонения выходного напряжения составляет максимум 5%. По 3 выходу потребляется импульсная мощность в течении 10 секунд с интервалом длительности повторения в 1000 секунд. Отсюда, рассчитан коэффициент заполнения импульсов по 3 выходу нагрузки:

$$K_{зан} = \frac{t}{T} = \frac{10}{1000} = 0.01$$

где t – длительность импульса

T – период повторения импульса

Для дальнейшего проектирования, введем в систему значения максимальной и минимальной разности температур источника энергии, вычислив их по формулам (1.1) и (1.2):

$$\Delta T_{\min} = T_{ист\min} - T_{сред\max} \quad (1.1)$$

$$\Delta T_{\max} = T_{ист\max} - T_{сред\min} \quad (1.2)$$

где $T_{ист\min}$ - минимальная температура источника тепла;

$T_{ист\max}$ - максимальная температура источника тепла;

$T_{сред\max}$ - максимальная температура окружающей среды;

$T_{сред\min}$ - минимальная температура источника тепла.

Используя формулы (1.1) и (1.2), проведем расчет максимальной и минимальной разницы температур источника энергии:

$$\Delta T_{\min} = 90^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C} = 65^{\circ}\text{C};$$

$$\Delta T_{\max} = 90^{\circ}\text{C} - (-25^{\circ}\text{C}) = 120^{\circ}\text{C}.$$

1.3 Расчёт усреднённых максимальной и минимальной мощностей источника энергии

Для правильного и точного проектирования системы, требуется определить среднюю максимальную и среднюю минимальную потребляемую мощность СЭП.

Рассчитаем суммарную максимальную усредненную мощность нагрузки на выходах СЭП:

$$P_{\text{max.уср}} = \frac{P_{1 \text{ max}}}{\eta_1} + \frac{P_{2 \text{ max}}}{\eta_2} + \frac{P_{3 \text{ текущ.}}}{\eta_3} + K_{\text{зан}} \frac{P_{3 \text{ имп.}}}{\eta_3} \quad (1.3)$$

где η - КПД импульсного стабилизатора напряжения;

$P_{n \text{ max}}$ – максимальная потребляемая мощность нагрузки;

$K_{\text{зан}}$ – коэффициент заполнения импульсного сигнала.

По формуле, аналогичной (1.3), рассчитаем суммарную минимальную усредненную мощность нагрузки на выходах СЭП:

$$P_{\text{min.уср}} = \frac{P_{1 \text{ min}}}{\eta_1} + \frac{P_{2 \text{ min}}}{\eta_2} + \frac{P_{3 \text{ текущ.}}}{\eta_3} + K_{\text{зан}} \frac{P_{3 \text{ имп.}}}{\eta_3} \quad (1.4)$$

где η - то же, что и формуле (1.3);

$P_{n \text{ min}}$ – минимальная потребляемая мощность нагрузки;

$K_{\text{зан}}$ – то же, что и формуле (1.3).

Так как на данном этапе расчетов не был произведен выбор типа импульсных стабилизаторов напряжения, которые обеспечивают

стабильность напряжения на выходах 1 - 3 СЭП, то их КПД предварительно принят равным 85%.

Подставим значения потребляемой мощности нагрузки из технического задания в формулы (1.3) и (1.4) и получим следующие значения:

$$P_{\text{max.уср}} = \frac{2.5}{0,85} + \frac{3.3}{0,85} + \frac{1}{0,85} + 0.01 * \frac{32}{0,85} = 8.28 \text{ Вт} \quad (1.5)$$

$$P_{\text{min.уср}} = \frac{0,1}{0,85} + \frac{0,2}{0,85} + \frac{0,1}{0,85} + 0.01 * \frac{32}{0,85} = 0,84 \text{ Вт} \quad (1.6)$$

Рассчитаем мощность нагрузки на выходах СЭП на интервале действия импульса потребления энергии по выходу 3:

$$P_{\text{max.имп}} = \frac{P_{1 \text{ max}}}{\eta_1} + \frac{P_{2 \text{ max}}}{\eta_2} + \frac{P_{3 \text{ текущ.}}}{\eta_3} + \frac{P_{3 \text{ импульсн.}}}{\eta_3} \quad (1.7)$$

где η - то же, что и в формуле (1.3);

$P_{n \text{ max}}$ – то же, что и в формуле (1.3).

Подставив значения в формулу (1.5), получим следующее значение импульсной мощности:

$$P_{\text{max.имп}} = \frac{2.5}{0,85} + \frac{3.3}{0,85} + \frac{1}{0,85} + \frac{32}{0,85} = 45.59 \text{ Вт} \quad (1.8)$$

Для наглядности, на данном этапе проектирования построены временные диаграммы процессов в СЭП при максимальном и минимальном потреблении мощности СЭП, чтобы посмотреть, как будет изменяться заряд

накопителя энергии и в какой период времени будет включаться ограничитель заряда.

Рассмотрим случай, когда потребление мощности будет максимальное, а источник энергии будет выдавать минимальную мощность. Для этого случая временные диаграммы приведены на рисунке 1. На временных диаграммах показаны: P_n – мощность, потребляемая нагрузкой, U – напряжение на накопителе энергии, $I_{огр}$ – ток ограничителя заряда.

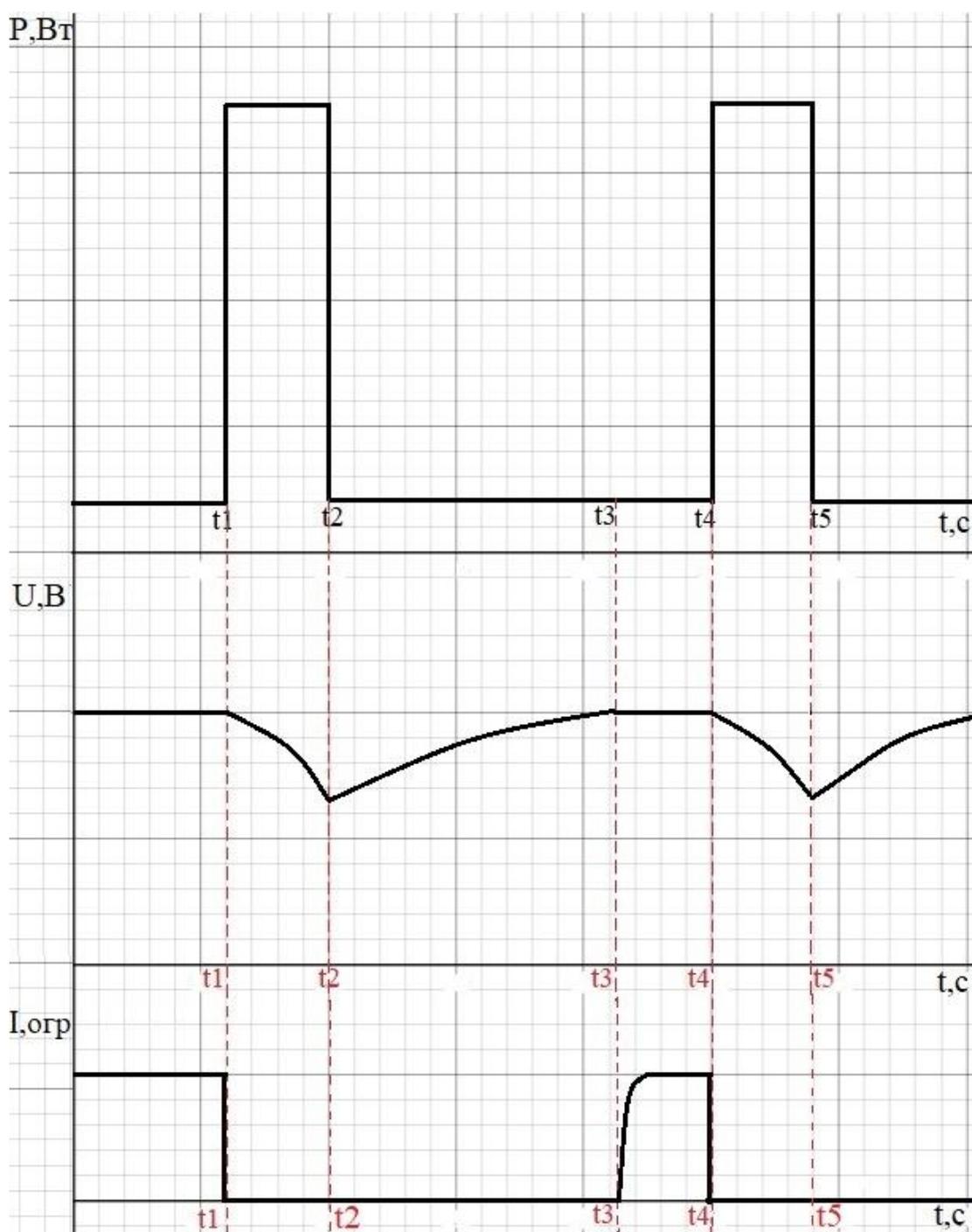


Рисунок 1 – Временные диаграммы процессов в СЭП при
максимальном потреблении мощности и минимальной мощности источника
энергии

Рассмотрим другой случай, когда мощность нагрузки будет минимальной, а источник энергии будет выдавать максимальную мощность. Для этого случая временные диаграммы приведены на рисунке 2.

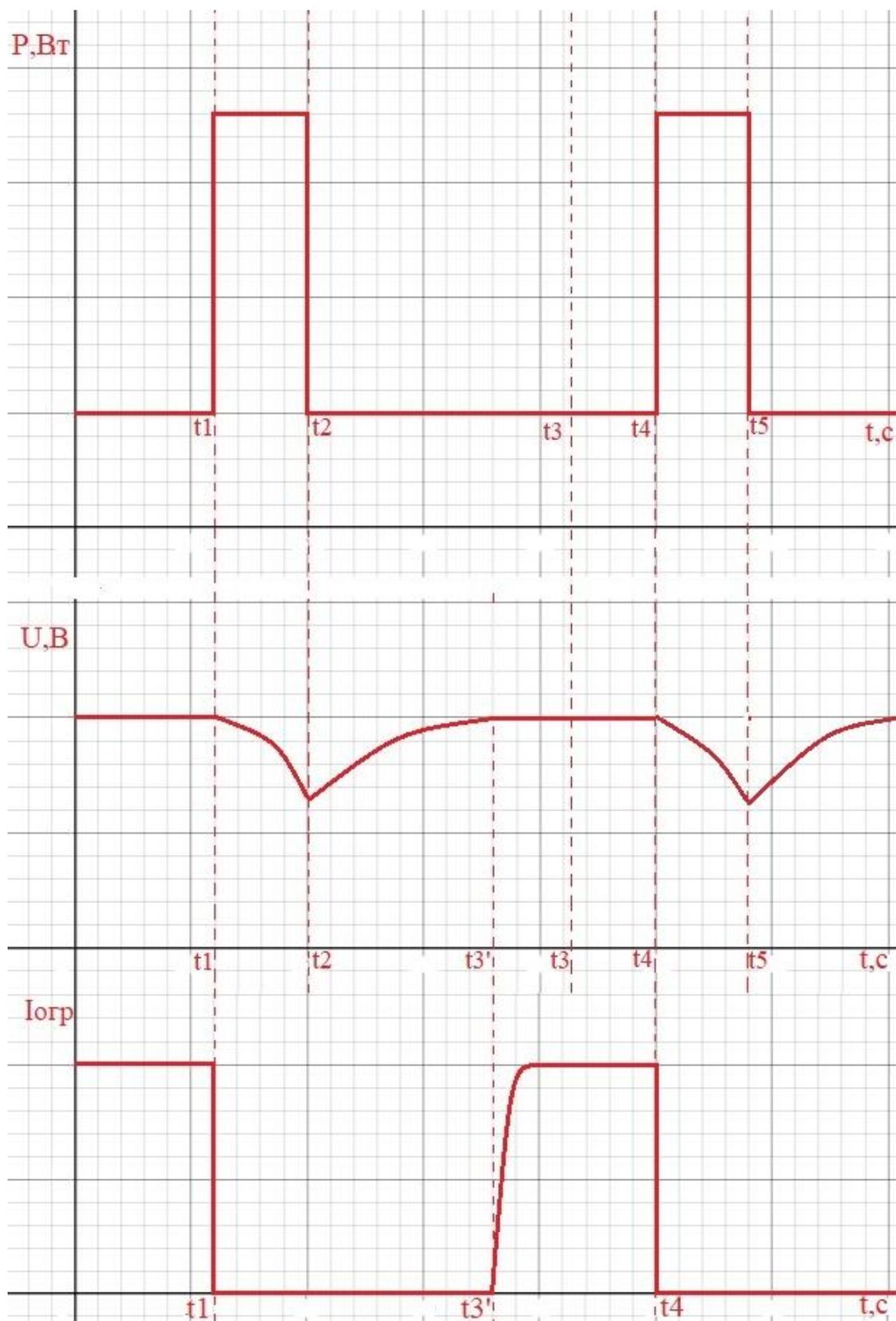


Рисунок 2 - Временные диаграммы процессов в СЭП при максимальном потреблении мощности и минимальной мощности источника энергии

На временных диаграммах, приведённых на рисунке 1 и рисунке 2 показаны следующие моменты времени:

t_1, t_4 — моменты начало действия импульса;

t_2, t_5 — моменты окончания действия импульса;

интервал времени $t_1 - t_2 = 10$ секунд (длительность импульса);

t_3 – время срабатывания ограничителя заряда при минимальной разнице температур;

t_3' - время срабатывания ограничителя заряда при максимальной разнице температур.

Исходя из графиков, будущая схема СЭП будет работать следующим образом:

В момент времени t_1 начинает действовать импульс нагрузки. Это приводит к разряду НЭ, т.к. мощность нагрузки превышает мощность источника энергии. и напряжение на нём начинает снижаться. В момент времени t_2 заканчивается импульс нагрузки. Это приводит к росту напряжения на НЭ, т.к. мощность нагрузки становится меньше мощности источника энергии.

Далее, до момента времени t_3 , когда разница температур минимальная, и до момента времени t_3' , когда разница температур максимальная, накопитель энергии принимает избыток энергии, который не приняла нагрузка. Достигнув момента времени t_3 , когда разница температур минимальная, и, до момента времени t_3' , когда разница температур максимальная, накопитель энергии полностью заряжается и включается ограничитель заряда, который забирает излишний ток. В момент времени t_4 ограничитель заряда прекращает свою работу, потому что снова начинает действовать импульсная нагрузка, приводящая к разряду накопителя энергии.

1.4 Разработка структурной схемы системы электропитания

Из анализа мощности, потребляемой нагрузкой, видно, что присутствуют средняя минимальная и максимальная мощность, а, так же, в течении короткого интервала времени потребляется значительная импульсная мощность, которая существенно превышает среднюю максимальную мощность.

В таком случае не рационально проектировать и изготавливать источник энергии на мощность, которая равна или превышает максимальную импульсную мощность, а целесообразно в систему электропитания ввести накопитель энергии, который будет накапливать энергию в течение длительного времени, когда мощность нагрузки меньше мощности источника энергии (ИЭ). На интервале времени, когда включается импульсная нагрузка, накопитель энергии будет отдавать накопленную энергию в нагрузку.

Кроме того, из анализа технического задания видно, что существует три потребителя энергии, которые предполагают электропитание с достаточно узким допуском отклонения напряжения в 5% от номинального. В таком случае, в составе СЭП должны быть стабилизаторы напряжения, обеспечивающие выполнение требований по стабильности напряжения. Из возможных вариантов следует выбрать импульсные стабилизированные преобразователи, потому что они обладают высоким КПД в отличии от стабилизаторов напряжения непрерывного принципа действия, у которых КПД ниже 50%. Учитывая, что при изменении внешних условий источник энергии может генерировать мощность от максимальной до минимальной, в зависимости от температуры горячей и холодной стороны, существует риск превышение допустимых значений напряжения на накопителе энергии. При этом, в случае использования в качестве НЭ химических источников тока (аккумуляторов) такой вариант очень нежелателен, потому что в разы сокращается ресурс химических источников тока. В случае использования в качестве НЭ ионистора (суперконденсатора), напряжение на нём может

превысить допустимое значение, что приведет к выводу ионистора из строя. Поэтому в составе СЭП должен присутствовать элемент, который ограничивает заряд на накопителе энергии.

В связи с вышеописанным, выстраивается следующая структурная схема системы электропитания.

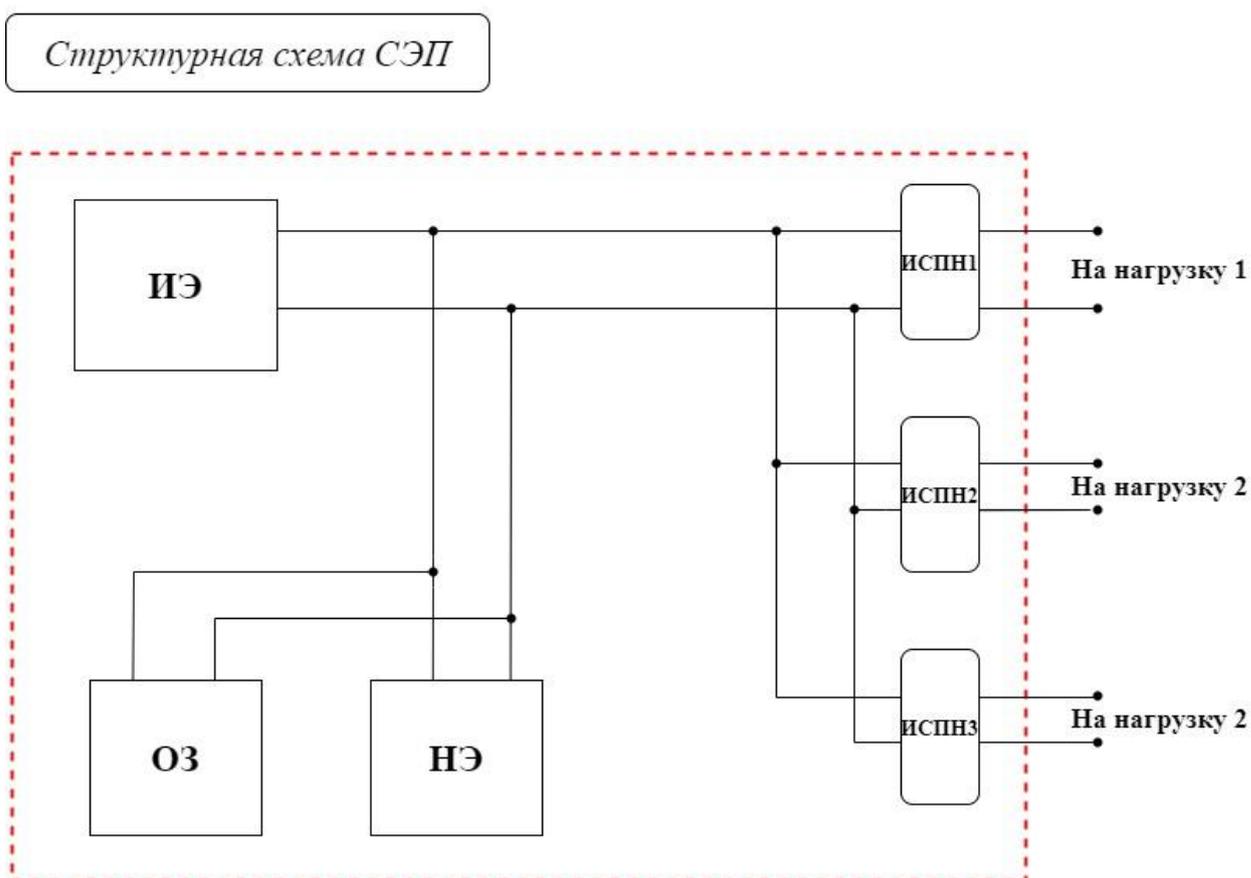


Рисунок 3 – структурная схема системы электропитания

На схеме изображены:

ИЭ – источник энергии (батарея термоэлектрических преобразователей);

ОЗ – ограничитель заряда;

НЭ – накопитель энергии;

ИСПН1, ИСПН2 и ИСПН3, – импульсные стабилизаторы напряжения.

2 Выбор марки термоэлектрогенератора, расчёт их количества и способа соединения в батарею в источнике энергии

Для реализации системы электропитания необходимо выбрать нужные генерирующие элементы. На рынке представлен огромный выбор элементов, которые генерируют тепловую энергию в электрическую. Но, учитывая, что система будет работать автономно, была изучена литература [14], и, сделан вывод, что источник энергии должен состоять из элементов на основе эффекта Зеебека или Пельтье.

Появилась задача понять, какой элемент выбрать. В основном, рынок насыщен элементами Пельтье, которые схожи с элементами Зеебека, но они имеют в пять раз меньше выходное напряжение, по сравнению с таким же элементом Зеебека. Поэтому, выбор пал на элемент Зеебека. На рынке их довольно мало, поэтому проанализировав большую часть, был выбран модуль SP1848-27145. Его размеры 40 мм × 40 мм × 4 мм, которые подходят для нашей системы.

Ниже представлена таблица 3 с характеристиками этого модуля и сам модуль на рисунке 4.

Таблица 3 – Характеристики модуля SP1848-27145

Разница температур (градус Цельсия)	Напряжение холостого хода, В	Ток короткого замыкания, мА
20	0.97	225
40	1.8	368
60	2.4	469
80	3.6	558
100	4.8	669

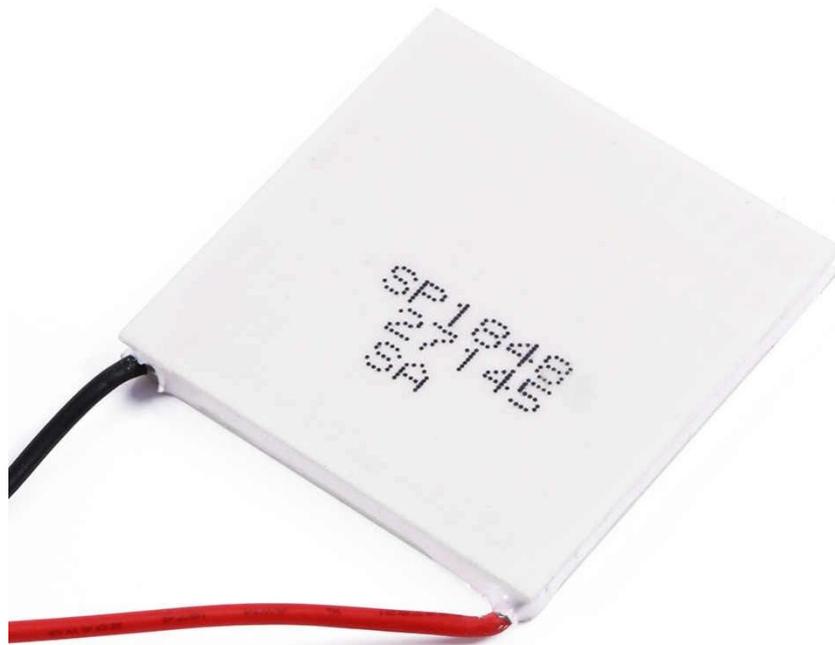


Рисунок 4 – модуль SP1848-27145

2.1 Расчет требуемого количества модулей термоэлектродгенераторов в составе батареи термоэлектродгенераторов

Используя формулы из технического анализа максимальной и минимальной разности температур в системе (1.1) и (1.2), найдем количество требуемых модулей. Рассмотрим два случая, когда разность температур будет минимальной и максимальной.

Рассчитаем количество модулей ТЭГ для минимальной разницы температур. Из анализа технического задания, воспользуемся формулой (1.1), где минимальная разница температур составляет 65 градусов Цельсия, тем самым рассчитаем минимальное количество модулей электропитания, необходимых для функционирования системы.

Используя данные из таблицы 3 для разницы температур в 60 градусов Цельсия, выбранный ТЭГ имеет следующие параметры:

- напряжение холостого хода модуля $U_{\text{хх.м}}=2.4 \text{ В}$;
- ток короткого замыкания модуля $I_{\text{кз.м}}=0.469 \text{ А}$;

Но, эти данные справедливы только для 60 градусов Цельсия. Поэтому, требуется провести расчет напряжение холостого хода U_{xx} и тока короткого замыкания $I_{кз}$ для разницы температур в 65 градусов Цельсия.

Обратившись к литературе [9] стало понятно, что характеристика мощности цепочки ТЭГ, при различных изменениях разности температур, изменяется линейно. Исходя из этого, для более удобных расчетов, принято решение сделать допущение и считать изменение мощности линейно.

Приняв линейное изменение мощности ТЭГ, были сделаны расчеты параметров модуля ТЭГ:

$$U_{xx65} = U_{xx.м} * 1.05 = 2.4 * 1.05 = 2.52 \text{ В}, \quad (1.9)$$

$$I_{кз.м65} = I_{кз..м} * 1.05 = 0.469 * 1.05 = 0.492 \text{ А}, \quad (1.10)$$

где $U_{xx.65}$ - напряжение холостого хода ТЭГ при разности температур 65 градусов Цельсия;

$I_{кз.65}$ - ток холостого хода ТЭГ при разности температур 65 градусов Цельсия.

Рассчитаем сопротивление источника энергии. Для удобства, сначала посчитаем сопротивление одного элемента ТЭГ.

$$R_{иэ} = \frac{U_{xx65}}{I_{кз65}} = \frac{2.52}{0.492} = 5.12 \text{ Ом}$$

где $R_{иэ}$ – сопротивление источника энергии;

U_{xx65} – то же, что и в формуле (1.9);

$I_{кз65}$ – то же, что и в формуле (1.10).

Примем количество модулей ТЭГ в цепи 8 штук и определим напряжение холостого хода и ток короткого замыкания:

$$U_{xx.из65} = U_{xx65} * 8 = 2.52 * 8 = 20.16 \quad (1.11)$$

где $U_{xx.из65}$ – напряжение холостого хода батареи ТЭГ;

U_{xx65} – то же, что и в формуле (1.9).

Воспользовавшись литературой [1], был сделан вывод, что при последовательном соединении модулей ТЭГ ток короткого замыкания $I_{кз}$ подвергаться изменениям не будет и составит $0,492 A$.

$$I_{кз.1цеп} = 0.492 A$$

Также, необходимо найти мощность одной цепочки ТЭГов. Чтобы ее посчитать, требуется знать напряжение и ток цепочки ТЭГов. На основании литературы [2], сделан вывод о том, что максимальная мощность, генерируемая ТЭГ, достигается тогда, когда напряжение одной цепочки ТЭГ равно его половине напряжения холостого хода, а ток - равен половине тока короткого замыкания.

Исходя из вышеописанного, найдем напряжение и ток одной цепочки ТЭГ для режима генерации максимальной мощности:

$$I_{1 цеп.} = \frac{I_{кз.1цеп}}{2} = \frac{0.492}{2} = 0.246 A; \quad (1.12)$$

$$U_{из min} = \frac{U_{xx.из65}}{2} = \frac{20.16}{2} = 10.08 B; \quad (1.13)$$

где $I_{1 цеп.}$ – ток одной цепочки ТЭГ;

$U_{из min}$ – напряжение источника энергии при минимальной разнице температур;

$U_{\text{хх.из}65}$ – то же, что и в формуле (1.11).

Исходя из найденных тока и напряжения, найдем мощность одной цепочки при минимальной разности температур:

$$P_{1 \text{ цеп.}} = U_{\text{из min}} * I_{1 \text{ цеп.}} = 10.08 * 0.246 = 2.48 \text{ Вт}$$

где $P_{1 \text{ цеп.}}$ – мощность одной цепочки ТЭГов;

$I_{1 \text{ цеп.}}$ – то же, что и в формуле (1.12);

$U_{\text{из min}}$ – то же, что и в формуле (1.13).

Поскольку, из формулы (1.6) видно, что средняя максимальная мощность нагрузки составляет 8.28 Вт, а, при этом, необходимо учитывать инженерный запас по мощности, видно, что одной цепочки не хватает, так как выходная мощность примерно в 4 раза меньше необходимой для функционирования системы. Поэтому, воспользовавшись литературой [5], стало понятно, что необходимо включить 4 цепочки параллельно, что приведет к росту тока и выходного напряжения батареи ТЭГ до необходимых значений.

Приняв во внимание изменения в количестве ТЭГ, рассчитаем ток батареи:

$$I_{\text{из.min}} = I_{1 \text{ цеп.}} * 4 = 0.246 * 4 = 0.984 \text{ А} \quad (1.14)$$

где $I_{\text{из min}}$ – ток источника энергии при минимальной разнице температур;

$I_{1 \text{ цеп.}}$ – то же, что и в формуле (1.12).

Рассчитав в формулах (1.13) и (1.14) напряжение и ток, находим мощность источника энергии при минимальной разнице температур:

$$P_{uэ.min} = U_{uэ.min} * I_{uэ.min} = 10.08 * 0.98 = 9.87 \text{ Вт} \quad (1.15)$$

где $P_{uэ.min}$ – мощность источника энергии при минимальной разнице температур;

$I_{uэ.min}$ – то же, что и в формуле (1.14).

$U_{uэ.min}$ – то же, что и формуле (1.13).

Полученная максимальная мощность источника энергии при минимальной разности температур составляет $P_{uэ.min} = 9,87 \text{ Вт}$, что больше средней максимальной мощности нагрузки, которая, согласно формуле (1.6), составляет 8.28 Вт. Исходя из этого, находим разность между мощностью нагрузки и мощностью источника энергии:

$$P_{зап} = P_{uэ.min} - P_{max.уср} = 9.87 - 8.28 = 1.59 \text{ Вт}$$

где $P_{зап}$ – избыток мощности, генерируемый источником энергии;

$P_{uэ.min}$ – то же, что и в формуле (1.15).

$P_{max.уср}$ – то же, что и в формуле (1.3).

Таким образом, источник энергии генерирует больше необходимой мощности для нагрузки на 1.59 Вт. Отсюда, можно предполагать, что избыток мощности – необходимый инженерный запас, равный 20% от максимальной усреднённой мощности нагрузки.

Согласно формуле (1.2), максимальная разность температур составляет 120 градусов Цельсия.

Взяв данные из таблицы 3 для разницы температур в 100 градусов Цельсия, выбранный ТЭГ имеет следующие параметры:

- напряжение холостого хода модуля $U_{xx.m} = 4.8 \text{ В}$;
- ток короткого замыкания модуля $I_{кз.m} = 0.669 \text{ А}$;

Но, стоит отметить, что данные значения справедливы только для разности температур в 100 градусов Цельсия. Поэтому, необходимо рассчитать напряжение холостого хода U_{xx} и тока короткого замыкания $I_{кз}$ для разницы температур в 120 градусов Цельсия.

$$U_{xx120} = U_{xx.m} * 1.2 = 4.8 * 1.2 = 5.76 \text{ В}; \quad (1.16)$$

$$I_{кз.m120} = I_{кз.m} * 1.2 = 0.669 * 1.2 = 0.869 \text{ А}; \quad (1.17)$$

где U_{xx120} - напряжение холостого хода ТЭГ при разности температур 120 градусов Цельсия;

$I_{кз120}$ - ток холостого хода ТЭГ при разности температур 120 градусов Цельсия.

Учитывая, что для минимальной разницы температуры требуется 8 последовательно соединенных и 4 параллельных цепочки ТЭГ, то считаем выходное напряжение и ток при максимальной разнице температур:

$$U_{иэ \text{ max}} = \frac{U_{xx120} * 8}{2} = \frac{5.76 * 8}{2} = 23.04 \text{ В}; \quad (1.18)$$

$$I_{иэ \text{ min}} = \frac{I_{кз120} * 4}{2} = \frac{0.869 * 4}{2} = 1.73 \text{ А}; \quad (1.19)$$

где $U_{иэ \text{ max}}$ – напряжение источника энергии при максимальной разнице температур;

$I_{иэ \text{ min}}$ – ток источника энергии при максимальной разнице температур;

I_{xx120} – то же, что и в формуле (1.17);

U_{xx120} – то же, что и в формуле (1.16).

Рассчитав в формулах (1.18) и (1.19) напряжение и ток, находим мощность источника энергии при максимальной разнице температур:

$$P_{uэ.маx} = U_{uэ\ маx} * I_{uэ.маx} = 23.04 * 1.73 = 39.85 \text{ Вт} \quad (1.20)$$

где $P_{uэ.маx}$ – мощность источника энергии при максимальной разнице температур;

$U_{uэ\ маx}$ – то же, что и формуле (1.18);

$I_{uэ\ маx}$ – то же, что и в формуле (1.19).

Таким образом, ИЭ представляет из себя 4 последовательно соединенных звеньев ТЭГ, каждое из которых состоит из 8 соединенных последовательно модулей SP1848-27145. На рисунке 9 изображена соединения модулей ТЭГ в ИЭ.

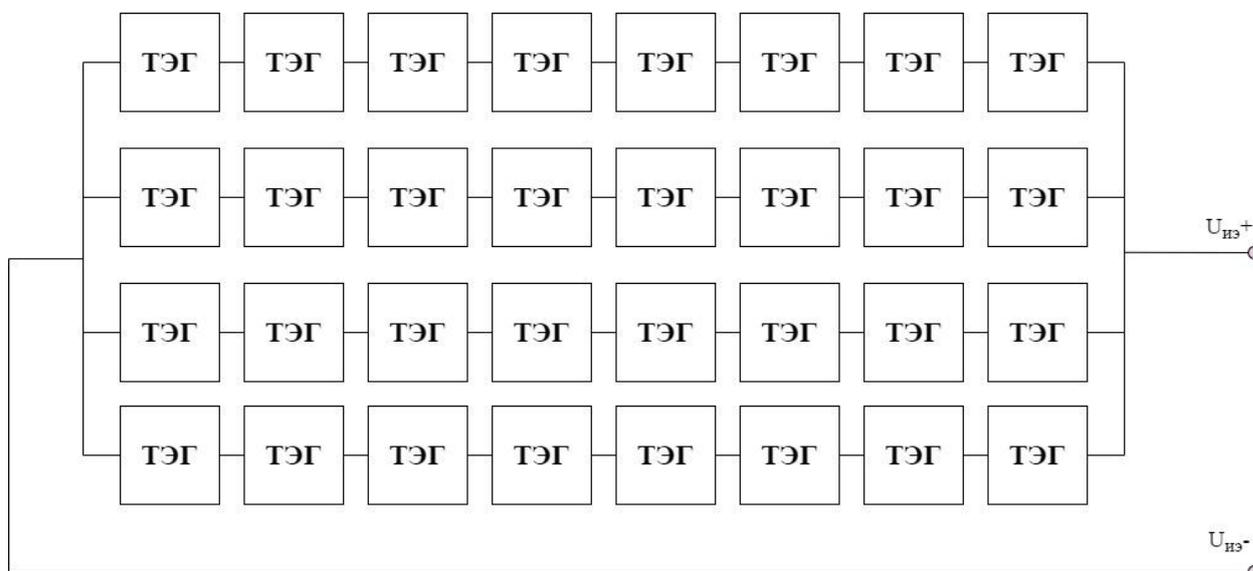


Рисунок 5 - Схема соединения модулей ТЭГ в ИЭ

2.2 Построение мощностных характеристик источника энергии

Учитывая, что система будет работать при разных температурных режимах, необходимо провести анализ мощностной характеристики системы.

Для ее создания мощностной характеристики, были рассмотрены два температурных режима, при которых система функционирует при минимальной и максимальной разнице температур, которые были рассчитаны, используя формулы (1.1) и (1.2).

На рисунке 6 приведены мощностная и внешняя характеристики ИЭ при разности температур в 65 градусов Цельсия. Значения, которые используются для построения характеристики, показаны в приложении А

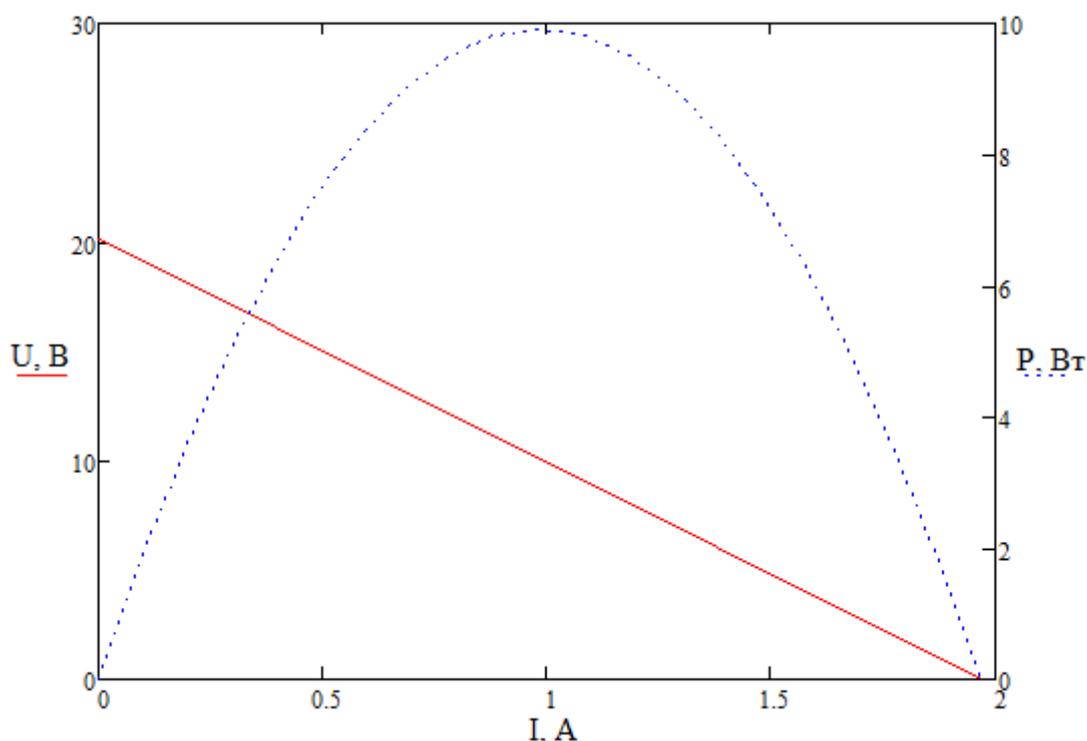


Рисунок 6 – Мощностная и внешняя характеристики ИЭ при разности температур в 65 градусов Цельсия

Проанализировав график на рисунке 10, сделан вывод, что при разности температур в 65 градусов Цельсия, источник энергии производит

максимальную мощность на уровне 9,87 Вт, что удовлетворяет требованиям к ИЭ.

На рисунке 11 приведены мощностная и внешняя характеристики ИЭ при разности температур в 120 градусов Цельсия. Значения, которые используются для построения характеристики, показаны в приложении Б

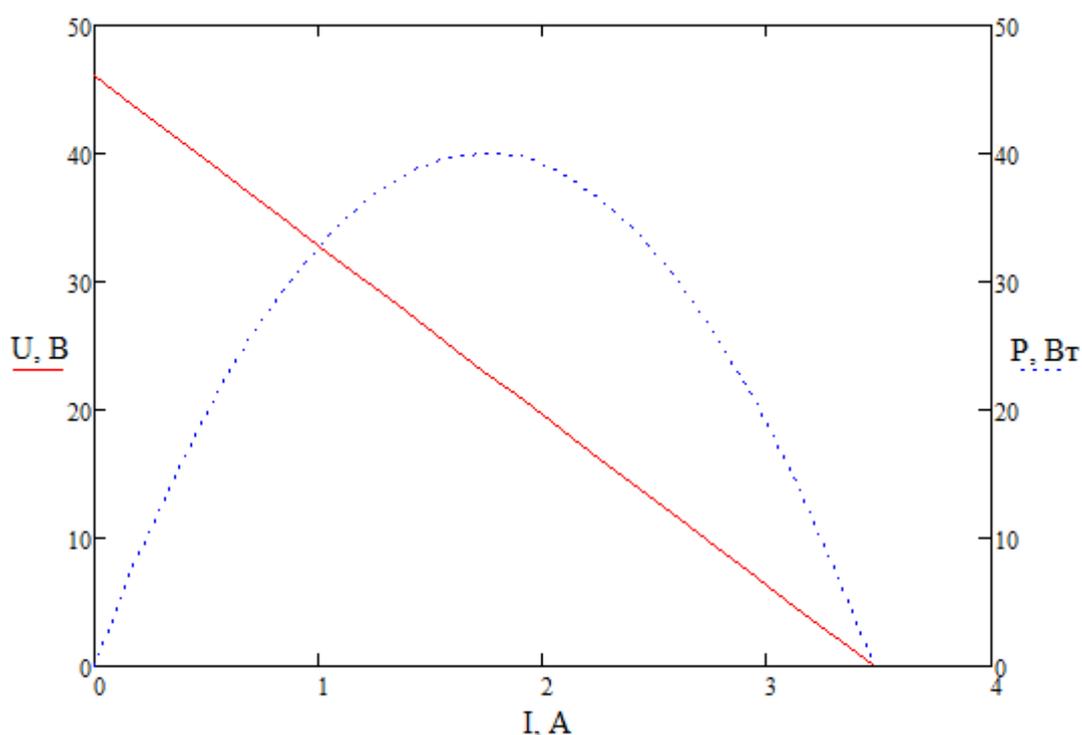


Рисунок 7 – Мощностная и внешняя характеристики ИЭ при разности температур в 120 градусов Цельсия

Проанализировав график на рисунке 7, сделан вывод, что при разности температур в 120 градусов Цельсия, источник энергии производит максимальную мощность на уровне 39,85 Вт, что соответствует рассчитанным параметрам ИЭ.

В итоге анализа мощностная и внешняя характеристики ИЭ, сделан вывод, что источник энергии, даже при минимальной разнице температур, генерирует достаточное количество энергии, необходимое для работы СЭП при заданных ТЗ требованиях к мощности нагрузки.

2.3 Выбор типа аккумуляторных элементов для накопителя энергии и определение количества аккумуляторных элементов в составе накопителя энергии

Аккумуляторы являются автономными источниками электрического тока, вырабатывая энергию из-за химических реакций внутри корпуса, которые способны заряжаться и накапливать электричество с последующей его отдачей.

В настоящее время на рынке представлен огромный выбор различных аккумуляторов, которые различаются емкостью, напряжением, технологией изготовления, размерами, выходом по току или сопротивлению, а также средой, в которой могут работать.

При рассмотрении автономного объекта стоит понимать, что у него есть определенный дневной цикл, поэтому один из главных критериев это заряд-разряд АБ при определенном режиме эксплуатации и расчет стоимости одного цикла.

Если сильно разрядить АБ, то практически каждая АБ довольно резко снизит допустимое количество оставшихся для нас циклов. Следовательно, не стоит разряжать более чем на 60%. Конечно, автоматика должна это контролировать.

Теперь можно рассмотреть какие АБ можно использовать как источник бесперебойного питания, взяв данные из литературы [11]:

1) Свинцово-кислотные аккумуляторы

Самые распространенные АБ считаются свинцово-кислотные и с жидким электролитом, и с герметизированным (AGM)

2) Тяговые аккумуляторы

Могут быть с жидким электролитом, и с герметизированным. Предназначены для циклических режимов работ, поэтому больше подходят

для работы в автономном режиме, но из-за довольно низкой плотности энергии, плохую переносимость к морозам и необходимость в обслуживании, данный аккумулятор не подходит для СЭП.

3) Герметичные свинцово-кислотные аккумуляторы

Принцип действия похож на автомобильный аккумулятор. Минусы такие же, только стоит выделить, что они дешевые и обеспечивают гораздо больше мощности, но и заряжаются дольше.

4) Щелочные аккумуляторы

Наибольшее распространение получили щелочные аккумуляторы на основе никель-кадмиевых или никель-железных композиций.

Они имеют очень большой срок службы и имеют более стабильное напряжение в процессе разряда. Применяются обычно в переносных или мобильных источниках питания, т.к. позволяют запасать большее количество энергии. Щелочные АБ любят полностью разряжаться, а потом полностью заряжаться. Тем самым, такие АБ не отдают резко большие токи, а отдают одну десятую медленно и до самой разрядки. Именно поэтому, такие аккумуляторы не нашли своего применения на автономных объектах.

5) Литий-ионные аккумуляторы.

Данные аккумуляторы очень эффективно снабжают небольшой мощностью в течение длительного периода времени. Так же, они обладают высокой удельной плотностью заряда, тем самым это позволяет им хранить значительное количество электрической энергии в небольшом объеме.

Рассмотрев различные вариации литий-ионных аккумуляторов, для СЭП подходят два варианта :

- 1) Литий-титанатные АКБ (LTO)
- 2) Литий-железо-фосфатные АКБ (LiFePO₄)

Сравнив литий-железо-фосфатные и литий-титанатные следующим списком:

- 1) Цена LiFePO_4 дешевле, чем LTO
- 2) Больше важна емкость АКБ нежели его скорость отдачи. В этом выигрывает LiFePO_4
- 3) LiFePO_4 на много компактнее LTO, т.к LTO собирается из банок формой цилиндра.
- 4) Что касемо температуры. LiFePO_4 стабильно выдерживает температуру в диапазоне от -30 до 50 градусов цельсия. А LTO выдерживает от -20 до + 50 при зарядке, и от -40 до +60 градусов цельсия при разрядке.

На данном этапе, казалось, LiFePO_4 самым подходящим вариантом, потому что он выигрывает все остальные аккумуляторы и подходит под систему электропитания.

Но, учитывая, что главный параметр для системы является заряд-разряд, были рассмотрены суперконденсаторы (ионисторы), используя литературу [3].

Ионистор, как и обычный конденсатор, имеют неограниченное количество циклов заряда-разряда и высокой пиковой отдаваемой мощностью. Но, они, имеют значительно большую емкость, которую можно сравнивать даже с аккумулятором. На практике, такой элемент служит в несколько раз дольше, чем аккумулятор различных типов.

Разберем основные преимущества ионистора над аккумулятором для СЭП:

- 1) Ионистор рассчитан на полный разряд до нулевого значения
- 2) Цикл заряд/разряд в сотни раз больше у ионистора, чем у АКБ
- 3) Ионистору не страшны максимальные значения тока.

Ионисторы могут заряжаться и разряжаться неограниченное количество раз, а, также, имеют низкое эквивалентное последовательное

сопротивление (0.01 Ом), что позволяет им быстро заряжаться и разряжаться. Также, они не теряют накопленный заряд во время хранения (как батареи).

Но, изучив литературу [7] исходит вывод, что ионисторы работают при низком напряжении, поэтому требуется последовательное соединение элементов, для обеспечения необходимым напряжением и емкостью.

Определим емкость батареи ионисторов. Воспользовавшись литературой [3], используем следующую формулу, которая связывает напряжение на конденсаторе (ионисторе) $U_c(t)$ с током через него:

$$U_c(t) = \frac{1}{C_{\delta}} \int_0^{\tau} i_c(t) dt + U_c(0) \quad (1.21)$$

где $i_c(t)$ – ток через ионистор;

$U_c(0)$ – напряжение на батарее ионисторов в начале действия импульса;

C_{δ} – емкость батареи ионисторов.

Примем приращение напряжения при разряде батареи ионисторов в 2.3 В, то есть $\Delta U_c = -2.3 \text{ В}$. Определим среднее напряжение на батарее ионисторов на интервале разряда. Примем максимальное напряжения заряда батареи ионисторов $U_{c.max}$ в 9,5 В. С учётом приращения напряжения на батарее ионисторов в $\Delta U_c = -2.3 \text{ В}$, получим минимальное напряжение на батарее ионисторов:

$$U_{c \min} = U_{c \max} - \Delta U_c = 9.5 - 2.3 = 7.2 \text{ В} \quad (1.22)$$

Определим среднее напряжение $U_{c.ср.разр}$ на батарее ионисторов:

$$U_{c\text{ ср}} = \frac{U_{c\text{ max}} + U_{c\text{ min}}}{2} = \frac{9.53 + 7.22}{2} = 8.37 \text{ В} \quad (1.23)$$

где $U_{c\text{ ср}}$ – среднее напряжение на батарее ионисторов;

$U_{c\text{ max}}$ – максимальное напряжение на батарее ионисторов;

$U_{c\text{ min}}$ – то же, что и в формуле (1.22).

Примем допущение, что ток $i_c(t)$ разряда ионистора мало меняется на интервале разряда ионистора, т. е. ток постоянный. Назовём его средним током разряда $I_{c\text{ ср}}$ и определим по выражению:

$$I_{c\text{ ср}} = \frac{P_{\text{имп. max}}}{U_{c\text{ ср}}} = \frac{45.59}{8.37} = 5.446 \text{ А} \quad (1.24)$$

где $P_{\text{имп. max}}$ – то же, что и в формуле (1.20);

$U_{c\text{ ср}}$ – то же, что и в формуле (1.23).

Поскольку средний ток разряда $I_{c\text{ ср}}$ постоянен, то преобразуем формулу (1.24) к виду:

$$U_c(t_u) = \frac{I_{c\text{ ср}} * t_u}{C_{\bar{o}}} + U_c(0) \quad (1.25)$$

где $U_c(0)$ – то же, что и в формуле (1.21);

$U_c(t_u)$ – напряжение на батарее ионисторов в конце действия импульса;

$I_{c\text{ ср}}$ – то же, что и в формуле (1.24);

t_u – длительность импульса;

$C_{\bar{o}}$ – то же, что и в формуле (1.21).

Преобразовав формулу (1.25), получим выражение для определения ёмкости C_{δ} батареи ионисторов:

$$C_{\delta} = \frac{-I_{c\text{ ср}} * t_u}{U_c(0) - U_c(t_u)}$$

где $U_c(0)$ – то же, что и в формуле (1.21);

$U_c(t_u)$ – то же, что и в формуле (1.25);

$I_{c\text{ ср}}$ – то же, что и в формуле (1.24);

t_u – то же, что и в формуле (1.25);

C_{δ} – то же, что и в формуле (1.21).

При разряде накопителя энергии, ток принимает отрицательное значение, поэтому формула будет выглядеть следующим образом:

$$C_{\delta} = \frac{-(-I_{c\text{ ср}} * t_u)}{U_c(0) - U_c(t_u)} = \frac{5.446 * 10}{2.3} = 23.6 \text{ Ф}$$

Из расчетов получается, что для системы необходима батарея ионисторов с допустимым напряжением $U_{\text{дон.}\delta}$, не менее 9.5 В и емкостью не менее 23.6 Ф.

Исходя из вышесказанного, необходимо подобрать ионистор, который при последовательном соединении даст необходимое напряжение и емкость. Лучшим решением взять ионистор VEC3R0107QG из литературы [12], изображенный на рисунке 8.



Рисунок 8 – ионистор VEC3R0107QG

Основные технические характеристики ионистора VEC3R0107QG представлены ниже, а дополнительные, в приложении В:

- 1) $U_{c.max} = 100\text{В}$
- 2) $C_6 = 3\text{В}$

Из литературы [8] известно, что ионистор не может работать на пределе своих возможностей, потому что это грозит быстрым выведением его из строя. Найдем допустимое рабочее напряжение одного ионистора:

$$U_{c\text{ раб}} = K_{исп\ c} * U_{c\text{ max}} \quad (1.26)$$

где $U_{c\text{ раб}}$ – рабочее напряжение ионистора;

$K_{исп\ c}$ - коэффициент использования ионистора из литературы [6];

$U_{c\text{ max}}$ – напряжение одного ионистора.

Подставим значения в формулу (1.26) и найдем рабочее напряжение ионистора:

$$U_{c\text{ раб}} = 0.8 * 3 = 2.4\text{ В}$$

Таким образом, для получения батареи ионисторов с допустимым напряжением, превышающим 9.5 В, необходимо последовательно включить N ионисторов, где:

$$N = \frac{U_{c \max}}{U_{c \text{ раб}}} = \frac{9.5}{2.4} = 3.95$$

где $U_{c \max}$ – то же, что и в формуле (1.23);

$U_{c \text{ раб}}$ – то же, что и в формуле (1.26).

Округляем до целого числа. Получаем число последовательно включённых ионисторов $M = 4$. Определим ёмкость батареи ионисторов, составленной из 4 последовательно включённых ионисторов VEC3R0107QG. При последовательном соединении ионисторов (конденсаторов) результирующая ёмкость определяется по выражению, взятое из литературы [13]:

$$\frac{1}{C_{\bar{o}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n} \quad (1.27)$$

где $C_{\bar{o}}$ – ёмкость батареи ионисторов;

$C_1 \dots C_n$ – ёмкости ионисторов, входящих в батарею.

При соединении в батарею ионисторов, имеющих одинаковую ёмкость, т.е. при $C_1 = C_2 = \dots = C_n = 100\Phi$ формула (1.27) примет вид:

$$C_{\bar{o}} = \frac{C_1}{M} = \frac{100 \Phi}{4} = 25 \Phi$$

Таким образом батарея из четырех последовательно соединённых ионисторов VEC3R0107QG имеет ёмкость в 25 Ф, что превышает минимально допустимую ёмкость в 23.6 Ф.

2.4 Выбор марки импульсных стабилизированных преобразователей

В электронных устройствах зачастую существует проблема их питания. Раньше использовались низкочастотные трансформаторы с выпрямителем и сглаживающим фильтром для преобразования и понижения напряжения, но они вызывают неудобства, потому что имеют тяжелый вес и большие габариты, а серийные линейные стабилизаторы имеют довольно низкий КПД для современной электротехники.

Поэтому, было принято решение использовать импульсные преобразователи. Различия от линейных преобразователей в следующем: импульсные преобразователи превосходят высокой производительностью, небольшим размерами и возможностью гальванической развязки цепей на входе и выходе.

В отличие от линейных, регулирующий элемент импульсных преобразователей работает в двух режимах:

- 1) Закрыт, и не пропускает электрический ток;
- 2) Открыт, и имеет минимальное проходное сопротивление.

Это и определяет высокий КПД импульсных преобразователей. Главным плюсом является то, что каждый режим обладает низким выделением тепла, из чего получается, что такие преобразователи имеют большой КПД, достигающий до 95%.

Для СЭП требуется различное напряжение на каждую нагрузку. Из анализа технического задания видно, что на нагрузку 1 требуется напряжение 15 В, на нагрузку 2 - 3.3 В, на нагрузку 3 – 24 В.

Поэтому, учитывая, что среднее напряжение на накопителе энергии составляет 8.37В, для питания каждой нагрузки нужно использовать импульсные преобразователи напряжения двух типов:

- 1) Повышающий импульсный преобразователь;
- 2) Понижающий импульсный преобразователь.

Для нагрузки 1 и 3 был выбран повышающий преобразователь марки SD6030-02-1 из литературы [4], который повышает выходное напряжение путем поворота движка потенциометра до стабильных 15В и 24В соответственно, изображенный на рисунке 9.



Рисунок 9 – повышающий импульсный преобразователь SD6030-02-1

Для нагрузки 2 был выбран понижающий преобразователь марки TPS62111RSAT, который понижает входное напряжение до стабильных 3.3В, изображенный на рисунке 10.

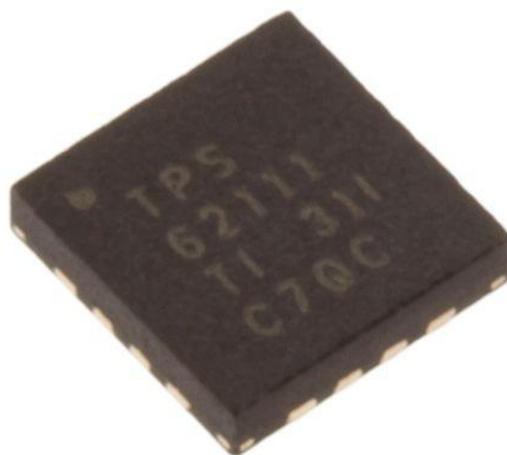


Рисунок 10 - понижающий импульсный преобразователь
TPS62111RSAT

В приложениях Г и Д приведены технические характеристики преобразовательных модулей. Из анализа технических характеристик преобразователей следует, что преобразователь SD6030-02-1 имеет значение КПД в 95%, а преобразователь TPS62111RSAT имеет значение КПД 94%.

С учётом значений КПД выбранных преобразователей уточним значения мощностей, потребляемых нагрузкой, по формулам (1.3) и (1.4):

$$P_{\max.\text{уср}} = \frac{2.5}{0,95} + \frac{3.3}{0,94} + \frac{1}{0,95} + 0.01 * \frac{32}{0,95} = 7.52 \text{ Вт}$$

$$P_{\min.\text{уср}} = \frac{0,1}{0,95} + \frac{0,2}{0,94} + \frac{0,1}{0,95} + 0.01 * \frac{32}{0,95} = 0,74 \text{ Вт}$$

3 Разработка схемы принципиальной ограничителя напряжения на накопителе энергии

В СЭП возможен случай, когда разница температур достигает максимума и источник энергии вырабатывает большое количества мощности, которое не потребляет нагрузка, а преобразователи напряжения имеют ограничения на определенный показатель входного напряжения.

Исходя из этого, требуется устройство, которое будет ограничивать диапазон различных сигналов, называется ограничителем. В данном случае, будет использоваться ограничитель заряда шунтирующего типа, чтобы избежать потери напряжения при минимальной разнице температур.

Была разработана схема ограничителя заряда шунтирующего типа, состоящая из транзистора, стабилитрона и резистора, которая показана на рисунке 11.

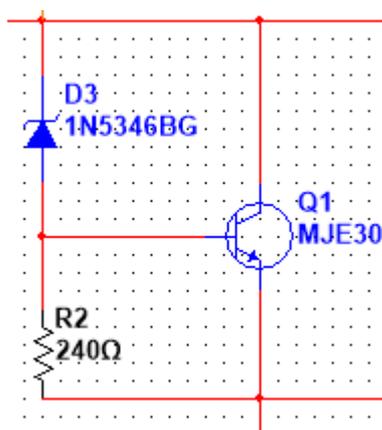


Рисунок 11 – Схема ограничителя заряда шунтирующего типа

Выбирая транзистор, был учтен случай, когда напряжение коллектор-эмиттер УКЭ может достигать максимальных значений ЭДС. Это происходит, когда нагрузка имеет минимальное потребление, а источник энергии работает при максимальной разнице температур и производит пиковую энергию, при этом ток будет равен нулю.

Поэтому, воспользовавшись литературой [10], найдем транзистор с максимально допустимым напряжением:

$$U_{КЭ.МАХ} > K_{ИТН} * E_{max} \quad (1.28)$$

где $K_{ИТН}$ - 0,75 - коэффициент использования транзистора по напряжению.

Подставим значения в формулу (1.28) и получим напряжение коллектор-эмиттер.

$$U_{КЭ.МАХ} > 0.75 * 46$$

$$U_{КЭ.МАХ} > 34.5 \text{ В}$$

С учетом рассчитанных значений, был выбран транзистор марки МJE3055Т n-p-n типа с максимально допустимым током в 10А и максимальном напряжении КЭ в 60В, что допустимо для системы, изображенный на рисунке 12. Данные по транзистору представлены в приложении Е.

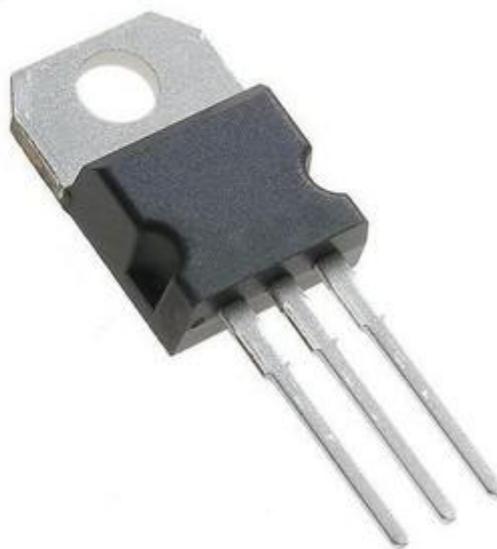


Рисунок 12 – транзистор МJE3055Т

3.1 Моделирование процессов в системе электропитания в режиме ограничения напряжения на накопителе энергии

Для того, чтобы убедиться в работоспособности системы, соберем её модель в среде multisim. Схема принципиальная модели СЭП приведена на рисунке 13. С целью сокращения времени расчёта процессов с использованием модели СЭП, в самой модели проведено масштабирование. Для этого ёмкость батареи ионисторов уменьшена в 10 000 раз, а частота коммутации импульсной нагрузки увеличена в 10 000 раз с сохранением относительной длительности импульса, потребляемого импульсной нагрузкой.

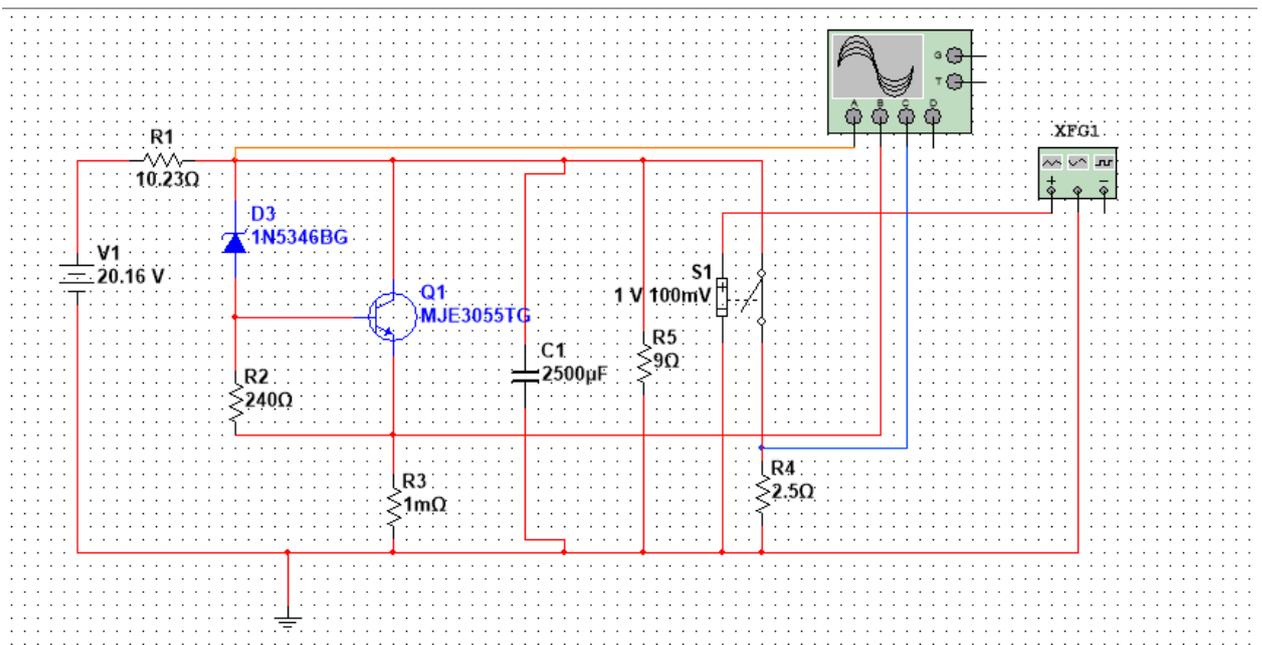


Рисунок 13 - экспериментальная схема СЭП при минимальной разнице температур в среде multisim

В данной схеме применена схема замещения ИЭ применительно к V1 и R1, а ЭДС источника равен U_{xx}

Для моделирования нагрузки в схему введены два резистора в качестве потребителей энергии. Первый источник R5 имитирует постоянную нагрузку, а второй источник, R4, имитирует импульсную нагрузку.

На рисунке 14 продемонстрирована осциллограмма заряда и разряда НЭ при минимальной разнице температур.



Рисунок 14 – график осциллографа при минимальной разнице температур

Линия оранжевого цвета соответствует напряжению накопителя энергии $U_{нэ}$. Шкала деления – 5В/дел.

Линия красного цвета соответствует току ограничителя заряда $I_{оз}$. Шкала деления – 0.5 А/дел.

Линия синего цвета соответствует току импульсной нагрузки I_n . Шкала деления – 1 А/дел.

На рисунке 14 видно, что в результате моделирования системы, во время потребления тока импульсной нагрузки I_n происходит разряд накопителя энергии $U_{нэ}$ с 9.5В до 7.2, после чего, накопитель энергии, снова уходит в режим насыщения до 9.5 В. Достигнув максимального напряжения, включается ограничитель заряда $I_{оз}$, который потребляет излишний ток, тем самым ограничивает заряд на накопителе энергии. Проанализировав рисунок 14, можно сравнить с рисунком 1, когда производились теоретические расчеты, и сделать вывод, что система работает также, как и при теоретических расчетах.

На рисунке 15 приведена схема СЭП при максимальной разнице температур.

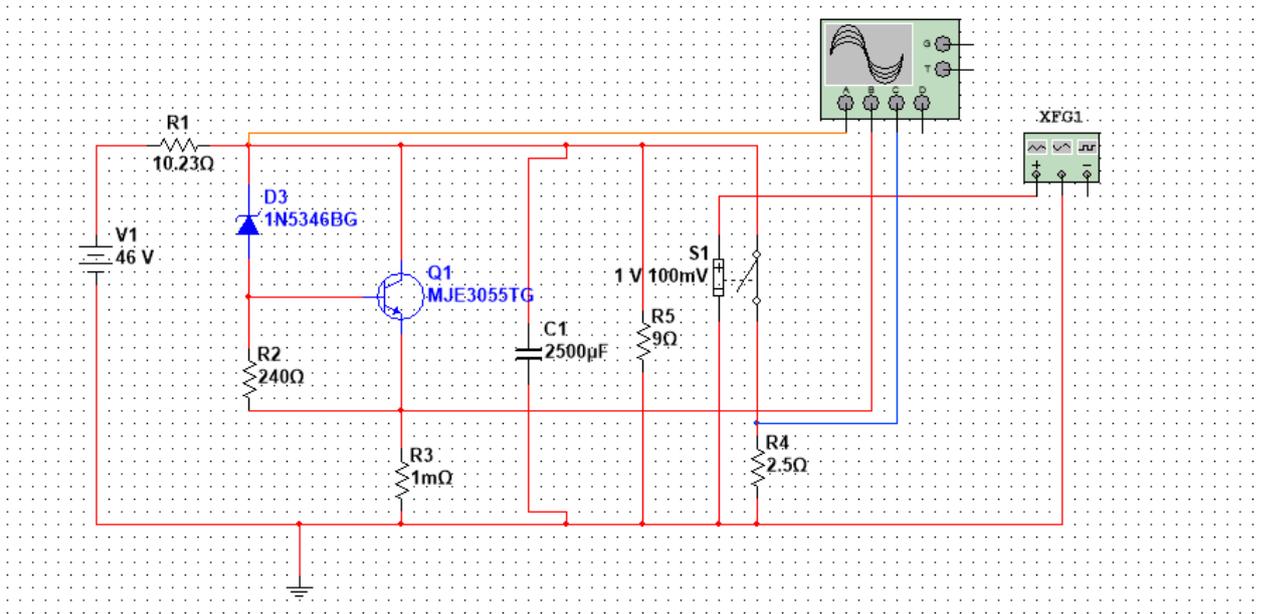


Рисунок 15 - экспериментальная схема СЭП при максимальной разнице температур

На рисунке 16 приведена осциллограмма заряда и разряда НЭ при минимальной разнице температур.

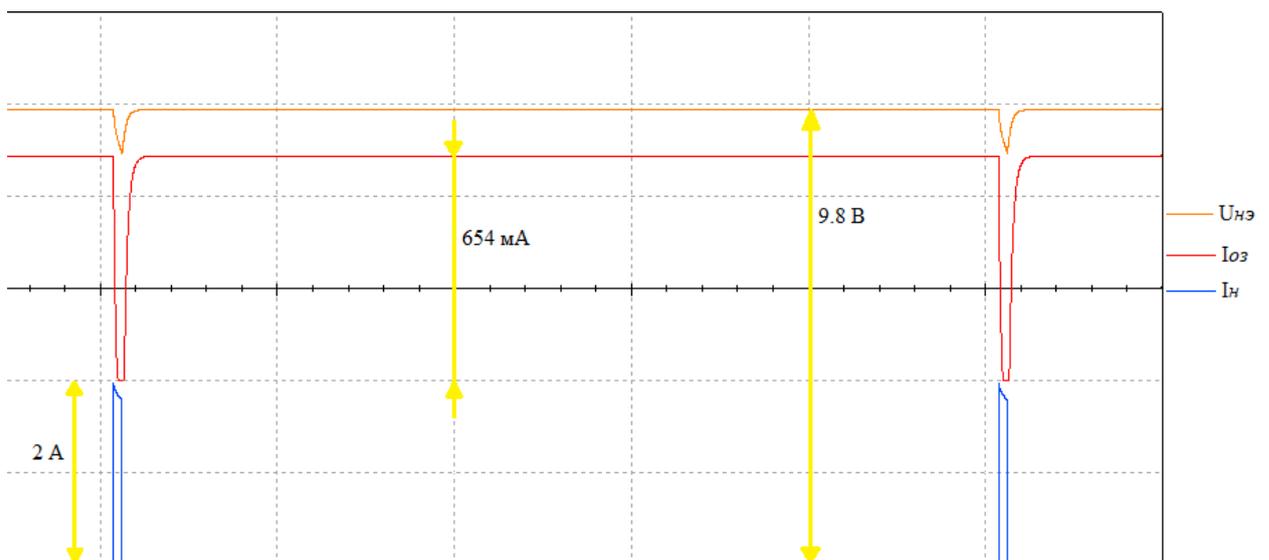


Рисунок 16 – график осциллографа при максимальной разнице температур

На рисунке 16 видны те же переходные процессы, что и для рисунка 14. Но, в случае, когда разница температур достигает максимума, напряжение на НЭ снижается на меньшую величину относительно случая, когда разница температур минимальная, а, именно, с 9.8В до 8.9В. При этом, сравнивая графики на рисунках 14 и 16, видно, что процесс заряда НЭ на рисунке 16 происходит быстрее. Также, в данном случае, когда включается ограничитель заряда, он потребляет больший излишний ток. Проанализировав рисунок 16, можно сравнить с рисунком 2, когда производились теоретические расчеты, и сделать вывод, что система работает также, как и при теоретических расчетах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения ВКР была разработана система автономного электропитания на основе геотермального источника.

В ходе работы был проанализирован рынок термоэлектрогенераторов, из которых был выбран наилучший термоэлектрогенератор, исходя из требований технического задания. Был проведён расчет количества термоэлектрогенераторов и способ их соединения в источник энергии, который вырабатывает энергию, необходимую для выполнения требований технического задания.

Так же, были выбраны импульсные стабилизаторы напряжения с высоким КПД, в соответствии с техническим заданием.

В связи с наличием нагрузки, которая потребляет значительную импульсную мощность, была разработана структурная схема системы электропитания, в состав которой введён накопитель энергии. Проанализировав различные варианты в качестве элементов накопителя энергии были выбраны ионисторы, преимуществом которых является высокий ресурс работы. Были разработана схема принципиальная для ограничителя заряда и рассчитаны параметры эго элементов.

В виртуальной среде Multisim была разработана имитационная модель СЭП, с использованием которой в которой были проведены эксперимента для двух режимов работы системы электропитания. Первый режим работы – режим работы при минимальной разнице температур на сторонах источника энергии и максимальной усреднённой мощности нагрузки. Второй режим работы – режим работы при максимальной разнице температур на сторонах источника энергии и минимальной усреднённой мощности нагрузки. Моделирование процессов в системе электропитания в этих крайних режимах показало работоспособность системы и обеспечение требований по генерируемой мощности и исключение превышения напряжения на накопителе энергии допустимого уровня.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ИЭ – источник энергии

ОН – ограничитель заряда

ТЭГ – термоэлектрогенератор

СЭП – система электропитания

НЭ – накопитель энергии

ИСН – импульсный стабилизатор напряжения

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Берикашвили, В. Ш. Электронная техника / В.Ш. Берикашвили, А.К. Черепанов. - Москва: Академия, 2012. - 336 с.
- 2 Бондарь, И. М. Электротехника и электроника / И.М. Бондарь. - Москва: МарТ, Феникс, 2014. - 352 с.
- 3 Горячева, Г.А. Конденсаторы выпуск № 1079 / Г. А. Горячева, Е. Р. Добромыслов. – Москва: «Радио и связь», 1984. – 82с.
- 4 Импульсные преобразователи напряжения. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: amperof.ru/elektrotribory/preobrazovateli-napryazheniya-impulsnyye.html.
- 5 Карпов, В. А. Электрические измерительные приборы / В. А. Карпов. – Москва: Московское Акционерное Издательское Общество, 1927. – 138с.
- 6 Краснобаев, Ю. В. Проектирование систем электропитания: учеб. пособие по курсовому и дипломному проектированию для студентов электротехн. спец. / Ю. В. Краснобаев, Е. Е. Носкова. - Краснояр. гос. техн. ун-т. – 2000 – 100 с.
- 7 Миловзоров, О. В. Электроника / О.В. Миловзоров, И.Г. Панков. - Москва: Юрайт, 2013. - 408 с.
- 8 Морозов, А. Г. Электротехника, электроника и импульсная техника / А.Г.Морозов. – Москва: Академия,1987. – 256 с.
- 9 Охотин, А. С. Термоэлектрические генераторы / А. С. Охотин, А. А. Ефремов, В. С. Охотин. – Москва: Атомиздат, 1971г. – 292с.
- 10 Рекус, Г. Г. Сборник задач по электротехнике и основам электроники / Г.Г. Рекус, А.И. Белоусов. - Москва: Высшая школа, 2014. - 416 с.
- 11 Рогинский, В. Ю. Современные источники электропитания / В. Ю. Рогинский. - Ленинград: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1969. – 104 с.
- 12 Современные ионисторы с номинальным напряжением 3 В. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.compel.ru

- 13 Чечурин, В. Л. Теоретические основы электротехники / В. Л. Чечурин, К. С. Демирчян, Н. В. Коровкин. – Санкт-Петербург: Питер, – 2003. - Том 1. – 463с.
- 14 Электротехнический справочник. - Москва: РадиоСофт, 2014. – Том 1. - 480 с.
- 15 СТО 4.2 07 2014. Система менеджмента качества. Общие требования к построению, изложению и оформлению документов учебной деятельности. – Взамен СТО 4.2 07 2012 ; дата введ. 09.01.2014. – Красноярск, 2014. – 60с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Значения для построения графика мощностной характеристики ИЭ при разности температур в 65 градусов Цельсия в виртуальной среде Mathcad.

	20.16	0	0 · 20.16
	19.152	0.0984	0.0984 · 19.152
	18.144	0.1968	0.1968 · 18.144
	17.136	0.2952	0.2952 · 17.136
	16.128	0.3936	0.3936 · 16.128
	15.12	0.492	0.492 · 15.12
	14.112	0.5904	0.5904 · 14.112
	13.104	0.6888	0.6888 · 13.104
	12.096	0.7872	0.7872 · 12.096
	11.088	0.8856	0.8856 · 11.088
U :=	10.08	I := 0.984	P := 0.984 · 10.08
	9.072	1.0824	1.0824 · 9.072
	8.064	1.1808	1.1808 · 8.064
	7.056	1.2792	1.2792 · 7.056
	6.048	1.3776	1.3776 · 6.048
	5.04	1.476	1.476 · 5.04
	4.032	1.5744	1.5744 · 4.032
	3.024	1.6728	1.6728 · 3.024
	2.016	1.7712	1.7712 · 2.016
	1.008	1.8696	1.8696 · 1.008
	0	1.968	1.968 · 0

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Значения для построения графика мощностной характеристики ИЭ при разности температур в 120 градусов Цельсия в виртуальной среде Mathcad.

	(46.08)		(0)		(0 - 46.08)
		43.776				0.1738				0.1738 - 43.776	
		41.472				0.3476				0.3476 - 41.472	
		39.168				0.5214				0.5214 - 39.168	
		36.864				0.6952				0.6952 - 36.864	
		34.56				0.869				0.869 - 34.56	
		32.256				1.0428				1.0428 - 32.256	
		29.952				1.2166				1.2166 - 29.952	
		27.648				1.3904				1.3904 - 27.648	
		25.344				1.5642				1.5642 - 25.344	
U1 :=		23.04		I1 :=		1.738		P1 :=		1.738 - 23.04	
		20.736				1.918				1.918 - 20.736	
		18.432				2.0856				2.0856 - 18.432	
		16.128				2.2594				2.2594 - 16.128	
		13.824				2.4332				2.4332 - 13.824	
		11.52				2.607				2.607 - 11.52	
		9.216				2.7808				2.7808 - 9.216	
		6.912				2.9546				2.9546 - 6.912	
		4.608				3.1284				3.1284 - 4.608	
		2.304				3.3022				3.3022 - 2.304	
		0				3.476				3.476 - 0	

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Технические характеристики ионистора VEC3R0107QG.

EDLC 3.0V 100F

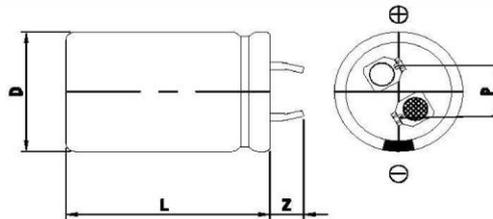
HyCap

FEATURES

Electric double layer capacitor
Higher power density with ultra low ESR
Semi-permanent, quick charge and discharge than batteries
Suitable for short-term peak power assistance application
UL and ISO/TS certificated, RoHS compliant
Radial design with 2-pin snap-in terminal type



DIMENSIONS



Dimensions in mm			
D +1.5 Max	L ± 2.0	Z ± 1.0	P ± 0.2
Φ22.0	45.0	6.0	10.0

This drawing is not to be scaled.

SPECIFICATIONS

Part Number	Rated Voltage, V_R (V)	Rated Capacitance (F)	AC ESR 1kHz (mΩ)	DC IR (mΩ)	Maximum Current (A)	Leakage Current (mA)	Stored Energy (J)	Dimension D x L (mm)	Weight (g)
VEC 3R0 107 QG	3.0	100.	6.00	10.00	75.	0.300	450.0	22.0 x 45.0	20.0

* Maximum Current: 1 second discharge to $\frac{1}{2} V_R$

* Leakage Current: After 72hours at V_R and 25°C

Item	Characteristics	Remarks
Rated Voltage(V_R)	3.0V	
Capacitance Tolerance	-10 ~ 30%	
Operating Temperature ($T_{min} \sim T_{max}$)	-40 ~ +65°C	$ \Delta cap \leq 30\%$ of initial value at 25°C $ \Delta ESR \leq 100\%$ of specified value at 25°C After 1,000 hours application of V_R at T_{max}
Storage Temperature	-40 ~ 70°C	
Cycle Life	500,000 cycles	$ \Delta cap \leq 30\%$ of initial value at 25°C $ \Delta ESR \leq 100\%$ of specified value at 25°C Cycles from V_R to $\frac{1}{2} V_R$ under constant current at 25°C
Shelf Life	2 years	$ \Delta cap \leq 10\%$ of initial value at 25°C $ \Delta ESR \leq 50\%$ of specified value at 25°C Without electrical charge under T_{max}

VIVA Tech

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Технические характеристики преобразователя напряжения TPS62111RSAT.

www.ti.com SLVS685A – JULY 2005 – REVISED FEBRUARY 2009

17-V, 1.5-A, SYNCHRONOUS STEP-DOWN CONVERTER

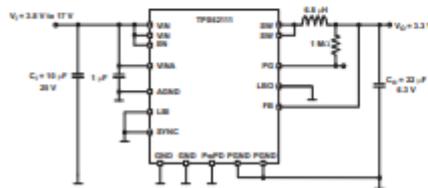
FEATURES

- High-Efficiency Synchronous Step-Down Converter With up to 95% Efficiency
- 3.1-V to 17-V Operating Input Voltage Range
- Adjustable Output Voltage Range From 1.2 V to 16 V
- Fixed Output Voltage Options Available in 3.3 V and 5 V
- Synchronizable to External Clock Signal up to 1.4 MHz
- Up to 1.5-A Output Current
- High Efficiency Over a Wide Load-Current Range Due to PFM/PWM Operation Mode
- 100% Maximum Duty Cycle for Lowest Dropout
- 20- μ A Quiescent Current (Typical)
- Overtemperature and Overcurrent Protected
- Available in 16-Pin QFN Package

APPLICATIONS

- Point-of-Load Regulation From 12-V Bus
- Organizers, PDAs, and Handheld PCs
- Handheld Scanners

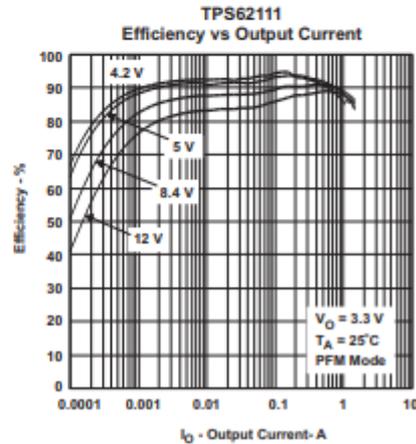
TYPICAL APPLICATION



DESCRIPTION

The TPS6211x devices are a family of low-noise synchronous step-down dc-dc converters that are ideally suited for systems powered from a 2-cell Li-Ion battery or from a 12-V or 15-V rail.

The TPS6211x is a synchronous PWM converter with integrated N- and P-channel power MOSFET switches. Synchronous rectification is used to increase efficiency and to reduce external component count. To achieve highest efficiency over a wide load-current range, the converter enters a power-saving, pulse-frequency modulation (PFM) mode at light load currents. Operating frequency is typically 1 MHz, allowing the use of small inductor and capacitor values. The device can be synchronized to an external clock signal in the range of 0.8 MHz to 1.4 MHz. For low-noise operation, the converter can be operated in PWM-only mode. In the shutdown mode, the current consumption is reduced to less than 2 μ A. The TPS6211x is available in the 16-pin (RSA) QFN package, and operates over a free-air temperature range of -40°C to 85°C .



ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Технические характеристики преобразователя напряжения SD6030-02-1

Technical Data 4314
Effective August 2017

SD6030
Low profile shielded drum core power inductors

Product specifications

Part Number ¹	OCL ¹ $\mu\text{H} \pm 30\%$	I_{rms}^2 (A)	I_{sat}^2 (A)	Typ. DCR $\text{m}\Omega @ +20^\circ\text{C}$	Max DCR $\text{m}\Omega @ +20^\circ\text{C}$	K-factor ⁴
SD6030-2R7-R	2.7	4.08	2.60	13	18	34
SD6030-3R3-R	3.3	3.54	2.40	18	24	30
SD6030-4R2-R	4.1	3.11	2.20	23	31	27
SD6030-5R0-R	4.9	2.81	1.90	28	38	24
SD6030-5R8-R	5.8	2.58	1.80	33	45	22
SD6030-7R8-R	7.8	2.38	1.60	39	53	19
SD6030-100-R	9.3	2.15	1.30	48	65	17
SD6030-120-R	11.3	1.99	1.20	56	76	16
SD6030-150-R	14.1	1.71	1.10	76	103	14
SD6030-180-R	17.1	1.65	1.00	82	110	13
SD6030-220-R	20.4	1.57	0.90	90	122	12
SD6030-270-R	26.0	1.31	0.85	130	175	11
SD6030-330-R	32.4	1.26	0.75	140	189	9.3
SD6030-360-R	34.4	1.19	0.70	157	212	8.7
SD6030-440-R	44.0	1.10	0.62	185	250	7.9
SD6030-520-R	52.0	0.99	0.58	226	305	7.2
SD6030-680-R	65.6	0.92	0.52	263	355	6.5
SD6030-820-R	81.6	0.80	0.46	343	463	5.9
SD6030-101-R	94.4	0.76	0.42	385	520	5.6
SD6030-121-R	110.1	0.70	0.40	517	620	5.6
SD6030-151-R	144.5	0.64	0.35	608	730	5.0
SD6030-181-R	175.7	0.55	0.32	817	980	4.5
SD6030-221-R	210.9	0.50	0.30	1000	1200	4.0
SD6030-271-R	264.2	0.44	0.27	1300	1560	3.6
SD6030-331-R	313.5	0.38	0.25	1733	2080	3.3
SD6030-391-R	373.7	0.35	0.22	2083	2500	3.0
SD6030-471-R	460.0	0.33	0.20	2250	2700	2.8
SD6030-561-R	546.2	0.30	0.18	2767	3320	2.5
SD6030-681-R	659.4	0.27	0.16	3458	4150	2.3

1) Open Circuit Inductance Test Parameters: 100 kHz, 0.1 V_{rms}, 0.0 Adc.

2) I_{rms} : DC current for an approximate ΔT of 40 °C without core loss. Derating is necessary for AC currents. PCB layout, trace thickness and width, air-flow, and proximity of other heat generating components will affect the temperature rise. It is recommended that the temperature of the part not exceed +125 °C under worst case operating conditions verified in the end application.

3) I_{sat} : Amps peak for 35% rolloff (@ +25 °C)

4) K-factor: Used to determine B_{p-p} for core loss (see graph). $B_{p-p} = K \cdot L \cdot \Delta I$ (B_{p-p} (mT), K: (K factor from table), L: (Inductance in μH), ΔI (Peak to peak ripple current in Amps)).

5) Part Number Definition: SD6030-xxx-R

SD6030 = Product code and size; xxx = inductance value in μH ; R = decimal point; if no R is present, third character equals number of zeros. -R suffix = RoHS compliant

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Технические характеристики биполярного транзистора МЈЕ3055Т.



COMPLEMENTARY SILICON POWER TRANSISTORS

...designed for use in general-purpose amplifier and switching applications

FEATURES:

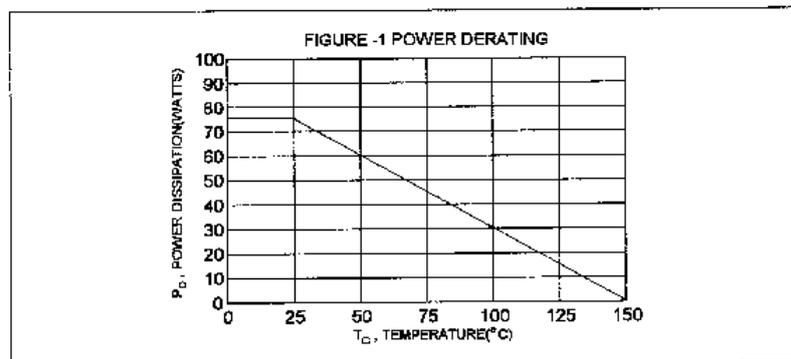
- * Power Dissipation - $P_D = 75 \text{ W}$ @ $T_C = 25^\circ\text{C}$
- * DC Current Gain $h_{FE} = 20 \sim 100$ @ $I_C = 4.0 \text{ A}$
- * $V_{CE(sat)} = 1.1 \text{ V (Max.)}$ @ $I_C = 4.0 \text{ A}$, $I_B = 400 \text{ mA}$

MAXIMUM RATINGS

Characteristic	Symbol	Rating	Unit
Collector-Emitter Voltage	V_{CEO}	60	V
Collector-Base Voltage	V_{CBO}	70	V
Emitter-Base Voltage	V_{EBO}	5.0	V
Collector Current-Continuous	I_C	10	A
Base Current	I_B	6.0	A
Total Power Dissipation @ $T_C = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	P_D	75 0.6	W W/°C
Operating and Storage Junction Temperature Range	T_J, T_{Stg}	-55 to +150	°C

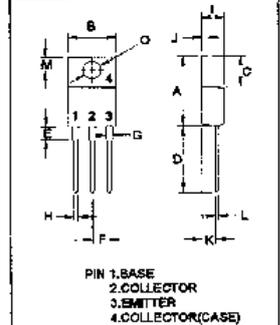
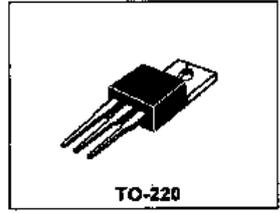
THERMAL CHARACTERISTICS

Characteristic	Symbol	Max	Unit
Thermal Resistance Junction to Case	$R_{\theta jc}$	1.67	°C/W



PNP	NPN
MJE2955T	MJE3055T

**10 AMPERE
COMPLEMENTARY SILICON
POWER TRANSISTORS
60 VOLTS
75 WATTS**



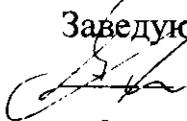
DIM	MILLIMETERS	
	MIN	MAX
A	14.68	15.31
B	9.78	10.42
C	5.01	6.52
D	13.06	14.62
E	3.57	4.07
F	2.42	3.68
G	1.12	1.36
H	0.72	0.96
I	4.22	4.98
J	1.14	1.38
K	2.20	2.97
L	0.33	0.55
M	2.48	2.98
O	3.70	3.90

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт космических и информационных технологий
Кафедра «Системы автоматизации, автоматизированное управление
и проектирование»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

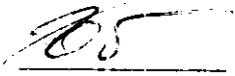
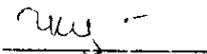
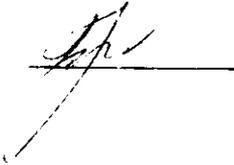
 С.В. Ченцов

« 21 » 06 2021 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

27.04.04 – Управление в технических системах

**СИСТЕМА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ АВТОНОМНОГО ОБЪЕКТА
НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ГЕОТЕРМАЛЬНОГО
ИСТОЧНИКА**

Руководитель		17.06.2021 г.	проф., д-р техн. наук Ю.В.Краснобаев
Выпускник		17.06.2021 г.	К.И.Чеботарев
Нормоконтролер		14.06.2021 г.	Т.А. Грудинова

Красноярск 2021