

Современные термоэлектрические источники питания электронных устройств

Пётр ШОСТАКОВСКИЙ
info@kryotherm.ru

Постоянно растущий интерес к автономным источникам электропитания для различных маломощных электронных и электрических устройств определил цель данной статьи — передать практический опыт применения термоэлектрического генераторного модуля (ТГМ) в составе генератора электрической энергии. В статье описаны критерии выбора ТГМ для конкретного применения, приведены результаты испытаний и дан анализ полученных результатов в сравнении со справочными данными и расчетными параметрами.

Введение

Быстрое развитие электроники в последние годы привело к множеству значимых результатов, один из которых — многократное снижение энергопотребления электронной аппаратурой со средней потребляемой мощностью до 1 Вт. Сегодня системы накопления электрической энергии позволяют аккумулировать ее за длительный отрезок времени с последующим использованием за короткий период. Появились конденсаторы с электрической емкостью в единицы фарад. Широкое распространение получили DC/DC-преобразователи с КПД свыше 95%, обеспечивающие, в частности, согласование внешней нагрузки с внутренним (не всегда постоянным) сопротивлением источника питания. Все эти достижения предоставляют возможность по-новому взглянуть на область применения термоэлектрических источников тока для питания современных электронных устройств. В первую очередь это касается приборов, которые по разным причинам нельзя подключать к сети переменного тока (недоступность сети, неоправданная дороговизна подключения, частые отключения и др.).

Необходимость создания простой в установке и эксплуатации, надежной конструкции термоэлектрического генератора (ТЭГ), действующего от тепловой энергии труб парового отопления или горячего водоснабжения, была подсказана многими запросами, полученными от компаний, занимающихся разработкой узлов учета расхода тепла, воды и газа, а также создающих системы охраны и сигнализации. Помимо этого, применение таких генераторов на магистральных тепло-

проводах предоставляет автономное питание аппаратуре, предупреждающей об потенциально ненадежных участках трубопроводов. Генератор может быть использован как самостоятельно, так и с другими альтернативными источниками электрической энергии, работающими на основе солнечной энергии, энергии ветра или воды.

Краткое введение в термоэлектричество

Термоэлектрические генераторы известны в технике чуть менее двух столетий, однако их промышленное применение началось относительно недавно, практически одновременно с открытием первых полупроводников. И по сей день термоэлектрическое преобразование тепловой энергии в электрическую нуждается в большей популяризации, особенно принимая во внимание возрастающую потребность в альтернативных источниках электрической энергии. К неоспоримым достоинствам термоэлектрической генерации электроэнергии следует отнести то, что преобразование тепловой энергии происходит в твердотельной конструкции, при отсутствии рабочих жидкостей, вращающихся деталей, вибрации, паразитных электромагнитных полей. Термоэлектричество позволяет утилизировать слабые тепловые потоки, не пригодные для других способов преобразования. Не менее важным достоинством термоэлектрических генераторов является их уникальная безальтернативность для целого ряда решений, в которых недоступны стандартные источники электрической энергии (линии электропередач), а также альтерна-

тивные источники, такие как ветер, солнечная радиация, и другое.

Любое термоэлектрическое устройство базируется на термопаре. Она состоит из контакта (спаев) двух разнородных металлов (а в частном случае полупроводников *p*- и *n*-типов), имеющих различную работу выхода электронов. Если через термопару пропустить тепловой поток Q_h , то на тепловом сопротивлении термоэлектрических элементов образуется разность температур, спаи будут иметь различную температуру и различную концентрацию свободных зарядов. Это послужит появлению термо-ЭДС, а при наличии замкнутой цепи — электрического тока (рис. 1). Чем больше разница температур горячей и холодной сторон (T_h и T_c), тем выше термо-ЭДС, тем больше сила тока в нагрузке и вырабатываемая мощность.

В соответствии с законом сохранения энергии разность энергии теплового потока на входе и выходе термопары ($Q_h - Q_c$) будет равна энергии выработанного электричества. Создание максимальной разности температур между горячей и холодной стороной термопары является условием выработки максимальной электрической мощности при прочих равных условиях.

Термопары, соединенные последовательно с помощью коммутационных пластин между двумя керамическими платами (рис. 2), образуют термоэлектрический генераторный модуль (ТГМ).

Если на одной стороне такого модуля температура будет отличаться от температуры другой стороны, то на выходе появится термо-ЭДС, причем ее значение прямо пропорционально разности температур горячей и холодной сторон. Величины теплового со-

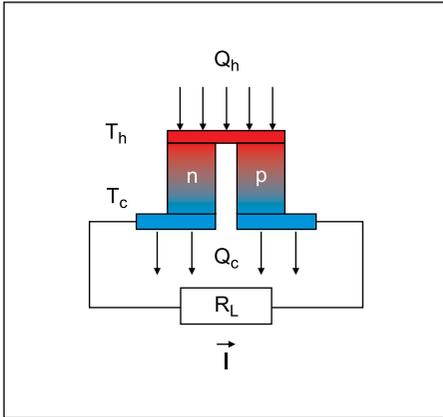


Рис. 1. Термопара на основе полупроводниковых термоэлектрических элементов

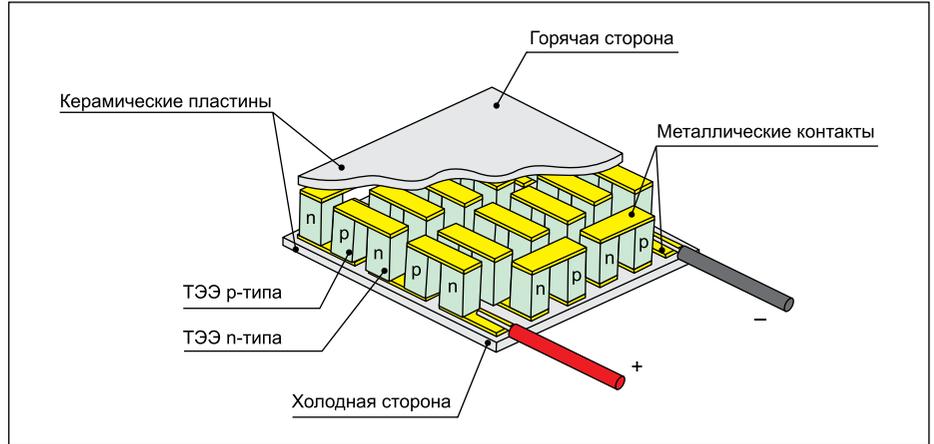


Рис. 2. Термоэлектрический генераторный модуль в разрезе

противления термоэлектрического модуля, максимальной рабочей температуры горячей стороны, значения термо-ЭДС для заданных условий, а также вырабатываемой мощности на согласованной нагрузке являются исходными для конструирования генераторной системы данными, публикуемыми изготовителем.

Конструкция термоэлектрического генератора

Конструкция любого термоэлектрического генератора (рис. 3) состоит из трех основных узлов: теплоъемника, обеспечивающего эффективную передачу тепла от источника тепла к ТГМ, собственно ТГМ и радиатора (в рассмотренной ниже конструкции воздушного типа), обеспечивающего отвод тепла в окружающую среду. На пути тепла каждый элемент конструкции характеризуется тепловым сопротивлением. Оптимизация значений тепловых сопротивлений позволяет получить наилучшую эффективность решения.

Как правило, переход от параметров ТГМ к параметрам генератора вызывает ряд конструктивно-технологических вопросов. В каждом применении они соответствуют его особенностям, однако есть ряд общих аспектов, которые будут рассмотрены ниже на примере применения ТГМ в генераторе с пассивным воздушным охлаждением и трубы парового отопления в качестве источника тепла.

Перед началом работ был выбран стандартный типоразмер стальной водогазопроводной трубы ВПП-40 с номинальным диаметром просвета 40 мм и толщиной стенок 3 мм. Относительно небольшой диаметр трубы был определен желанием создать наихудшие условия

передачи тепла от носителя к ТГМ. Дело в том, что чем больше диаметр трубы, от которой получается тепло, тем равномернее толщина теплоъемника от центра к его краям. Это обеспечивает большую равномерность теплового потока через ТГМ и большую эффективность термоэлектрической генераторной системы. В силу необходимости обеспечения максимальной надежности конструкции генератора применен конвекционный способ отвода тепла в окружающую атмосферу без увеличивающих интенсивность теплообмена вентиляторов. Такая конструкция не содержит вращающихся, быстро изнашивающихся деталей, однако сопряжена с необходимостью относительного увеличения размеров радиатора для достижения приемлемо малой величины теплового сопротивления.

Ключевым узлом конструкции является ТГМ. Компания «КРИОТЕРМ» предлагает широкий спектр генераторных модулей, имеющих различные параметры и оптимизированных для разных вариантов применения. При малых перепадах температуры и при воздушно-конвекционном способе отвода тепла в окружающую среду наиболее эффективно применение ТГМ с высоким тепловым сопротивлением (этот параметр указан в каталоге производителя) в сочетании с максимальным вырабатываемым напряжением (при прочих равных условиях определяется числом термопар в ТГМ). Исходя из этого, одним из наиболее оптимальных модулей можно считать ТГМ-199-1,4-3,5, параметры которого приведены на рис. 4.

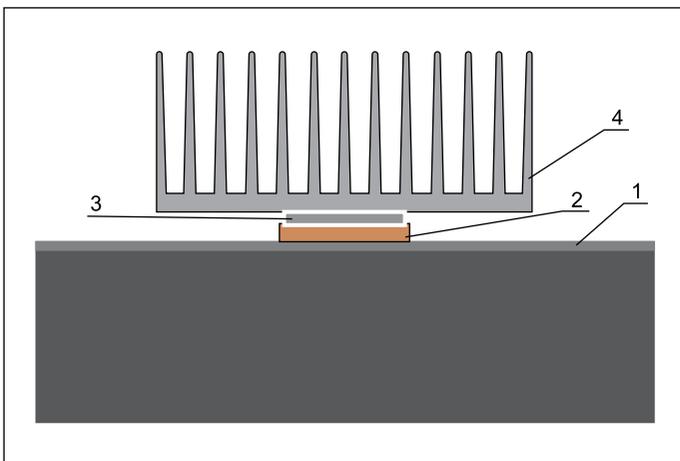


Рис. 3. Конструкция термоэлектрического генератора:
1 — источник тепла; 2 — теплоъемник;
3 — термоэлектрический генераторный модуль; 4 — радиатор охлаждения

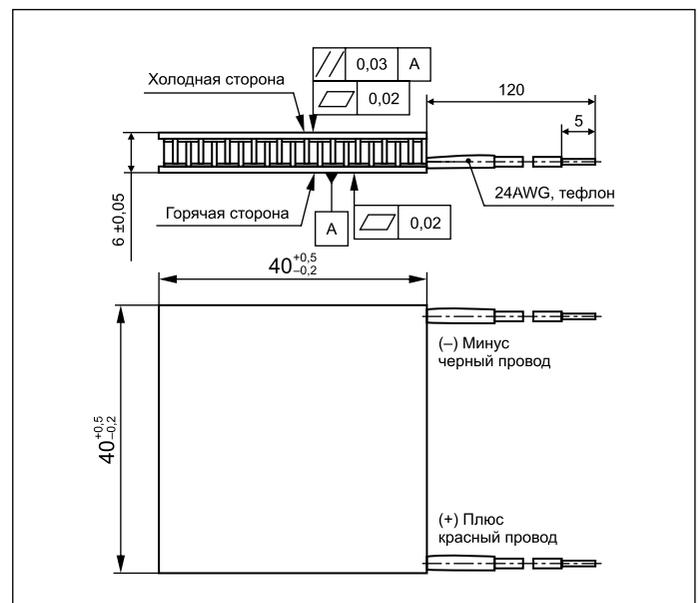


Рис. 4. Электрические и конструктивные параметры ТГМ-199-1,4-3,5

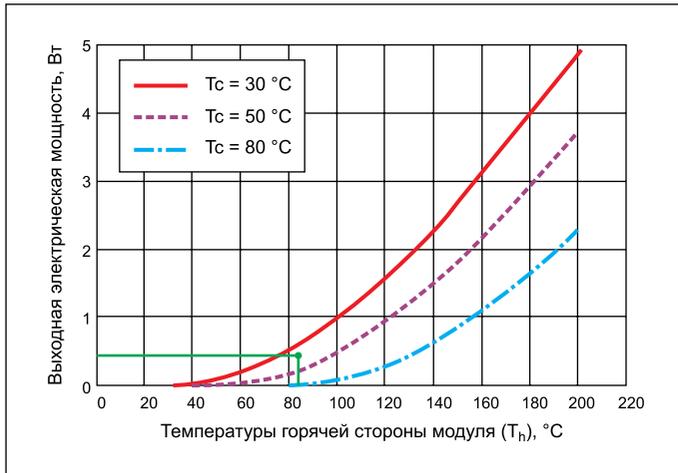


Рис. 5. Расчетные графики зависимости выходной электрической мощности ТГМ-199-1,4-3,5 от температуры горячей стороны модуля

Величина внутреннего сопротивления ТГМ зависит от рабочей температуры. Решение задачи согласования сопротивления нагрузки с внутренним сопротивлением ТГМ позволяет получить наилучшую эффективность генератора и максимальную вырабатываемую электрическую мощность. Внутреннее сопротивление ТГМ возрастает с повышением температуры, и в соответствии со справочными данными компании «КРИОТЕРМ» величина внутреннего сопротивления выбранного модуля составляет 4,1 Ом для температуры +22 °C и 6,5 Ом для температуры горячей стороны 200 °C. Внутреннее сопротивление ТГМ может отличаться от номинального в пределах допуска, определенного в спецификации.

Вырабатываемая мощность пропорциональна квадрату разности температур между горячей и холодной сторонами. График расчетной зависимости выходной мощности от температуры нагреваемой («горячей») стороны выбранного ТГМ для различных фиксированных значений температуры холодной стороны модуля представлен на рис. 5.

Как было упомянуто, для эффективной работы термоэлектрической генераторной системы необходимо выполнить согласование тепловых сопротивлений источника тепла (в нашем случае это горячая вода, тепловая энергия которой через стенки стальной трубы и теплоемник передается к нагреваемой стороне ТГМ). Паразитным оттоком тепла через воздух мы пренебрегаем, принимая во внимание, что теплопроводность воздуха несравнимо мала с теплопроводностью узлов конструкции и что нагреваемые узлы конструкция будут по возможности теплоизолированы.

В общем случае для установившегося теплового режима, тепловое сопротивление Rt определяет падение температуры на пути прохождения заданного теплового потока:

$$Rt = h/\lambda \times S, \quad (1)$$

h — толщина теплопроводящего слоя, м; λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); S — площадь области теплообмена, м².

В стационарном режиме температура теплового потока будет падать пропорционально тепловому сопротивлению на его пути.

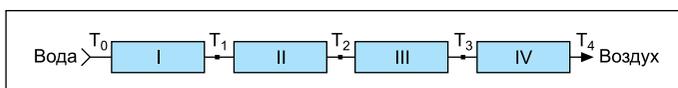


Рис. 6. Тепловые сопротивления элементов конструкции на пути теплового потока: I — стальная труба; II — теплоемник; III — ТГМ; IV — радиатор; Т₀ — температура теплоносителя; Т₁ — температура на поверхности трубы; Т₂ — температура горячей стороны ТГМ; Т₃ — температура холодной стороны модуля; Т₄ — температура окружающего воздуха

Определив тепловые сопротивления деталей конструкции, мы можем рассчитать температуры в ее различных точках. Наиболее важными для нас являются значения T_2 и T_3 (рис. 6) — величины температур на горячей и холодной сторонах ТГМ, поскольку, зная их, мы можем определить расчетное значение мощности, вырабатываемой модулем в заданных условиях.

Из справочной литературы выбираем коэффициент теплопроводности стали равным 47 Вт/(м·К). Оценим тепловое сопротивление участка стальной трубы, через который осуществляется передача тепла. Фактическое значение толщины стенок использованного отрезка стальной трубы составляет 2,5 мм, приведенное сечение, через которое будет производиться передача тепла, — 40×40 мм (площадь ТГМ). Таким образом, в упрощенном виде тепловое сопротивление участка стальной трубы, через которое осуществляется передача тепла, составляет $2,5 \times 10^{-3} / 47 \times 4 \times 10^{-2} \times 4 \times 10^{-2} = 0,53$ К/Вт.

Коэффициент теплопроводности латуни из справочной литературы примем равным 111 Вт/(м·К), тогда тепловое сопротивление латунного теплоемника в зоне установки ТГМ при средней толщине 8 мм составит $8 \times 10^{-3} / 111 \times 4 \times 10^{-2} \times 4 \times 10^{-2} = 0,05$ К/Вт.

Тепловое сопротивление примененного в конструкции модуля составляет 2,4 К/Вт (справочная информация, приводимая производителем).

В качестве радиатора холодной стороны в генераторе предусмотрен стандартный экструзионный радиатор марки сплава АД31, имеющего теплопроводность 188 Вт/(м·К). Периметр поперечного сечения радиатора равен 1224 мм, длина выбранного варианта 160 мм, толщина основания 6 мм. Профиль сечения приведен на рис. 7.

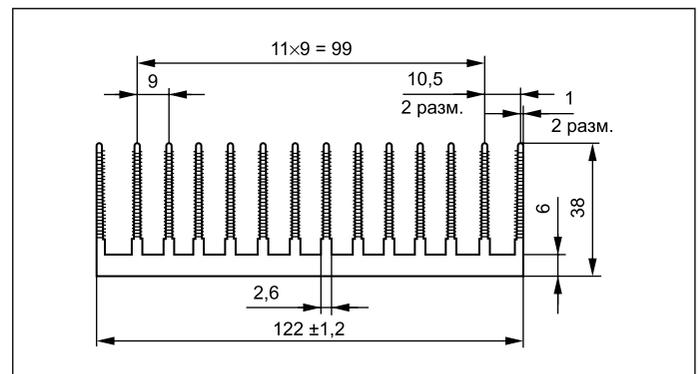


Рис. 7. Профиль сечения радиатора охлаждения, примененного в конструкции генератора

Самостоятельно выполним расчет теплового сопротивления радиатора, для чего воспользуемся программой KRYOTHERM, размещенной в свободном доступе на сайте компании (www.kryotherm.ru). Это поможет сделать раздел программы расчета термоэлектрической системы (thermoelectric system calculation), в котором расчет теплового сопротивления радиатора выделен в специальный подраздел. Путем введения поправочного коэффициента (base irregularity coefficient) программа позволяет учесть несоответствие размера термоэлектрического модуля рабочей площади радиатора. В качестве базового программа предлагает его значение равным 1,2. Коэффициент теплового обмена выбран равным 6 Вт/(м²·К) (в описании к программе рекомендованный интервал значений для свободной конвекции от 2 до 10 Вт/(м²·К)). Результаты расчета определяют тепловое сопротивление радиатора равным 0,236 К/Вт и приведены на рис. 8.

Учтем тепловое сопротивление термопасты, использованной при сборке генератора, и рассчитаем его значение для толщины слоя 30 мкм (стандартно от 30 до 100 мкм). При коэффициенте тепловой проводимости равном 0,8 Вт/(м·К) для указанного слоя при размере 40×40 мм, тепловое сопротивление одного слоя термопасты будет равно $3 \times 10^{-5} / 0,8 \times 4 \times 10^{-2} \times 4 \times 10^{-2} = 0,023$ К/Вт.

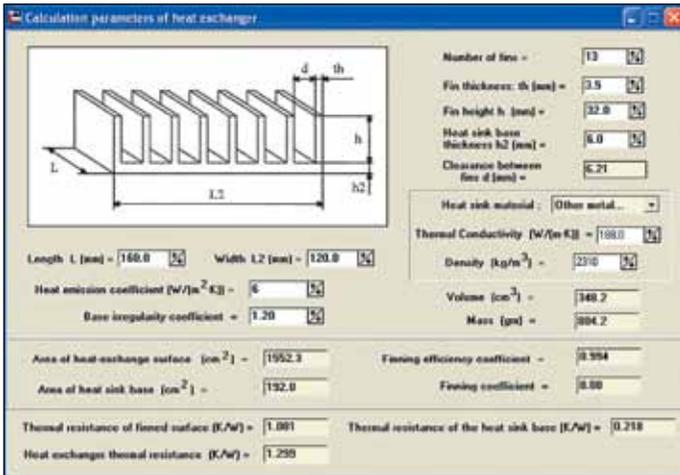


Рис. 8. Расчет параметров радиатора холодной стороны в программе KRYOTHERM

Таблица 1. Расчетные значения температур ключевых точек конструкции

Тепловое сопротивление	Расчетное значение, К/Вт	Температура в точках конструкции	Расчетное значение, °С
		T_0	+95*
I	0,53+0,02	T_1	+85
II	0,05+0,02	T_2	+83
III	2,4	T_3	+42
IV	1,3+0,02	T_4	+20*

Примечание. * Исходные значения.

Это значение будет добавлено в таблице 1 к величинам теплового сопротивления трубы, теплоъемника и радиатора.

Приняв температуру теплоносителя (воды в трубе) +95 °С и температуру окружающего воздуха +20 °С (значения из реальных условий эксперимента, результаты которого будут приведены ниже) и распределив падение температуры пропорционально тепловым сопротивлениям конструкции, получаем расчетное значение температур T_2 и T_3 на горячей и холодной сторонах ТГМ равными +83 °С и +42 °С соответственно (табл. 1).

Рабочая точка модуля выбирается на графике рис. 5. Она определяется точкой пересечения проекции значения температуры горячей стороны с графиком, построенным для температуры холодной стороны +30 °С (точка смещена вправо с учетом того, что расчетная температура соответствует +42 °С). Для температуры горячей стороны +82 °С расчетная мощность оставит порядка 0,3 Вт.

Некоторые особенности сборки генератора и его применения на объекте

При выборе степени чистоты обработки рабочих поверхностей сопрягаемых деталей генератора, а также при их сборке необходимо выполнять ряд мер, позволяющих обеспечить максимальную эффективность передачи тепла от теплоносителя (воды или пара) через стенки трубы к термоэлектрическому модулю и от него в окружающую среду при помощи воздушного радиатора.

Поверхности, через которые передается тепловой поток, шлифуются для обеспечения наилучшего теплового контакта (максимальной плотности физических точек соприкосновения). Для наибольшего теплового контакта компания «КРИОТЕРМ» поставляет ТГМ, имеющие точность рабочих поверхностей по плоскостности и параллельности в пределах 10 мкм.

Все области сопрягаемых деталей конструкции, не имеющие механического контакта, будут разделены воздушной прослойкой. Воздух плохо проводит тепло, и для повышения эффективности теплопередачи конструкции пространство внутри неровностей и ше-

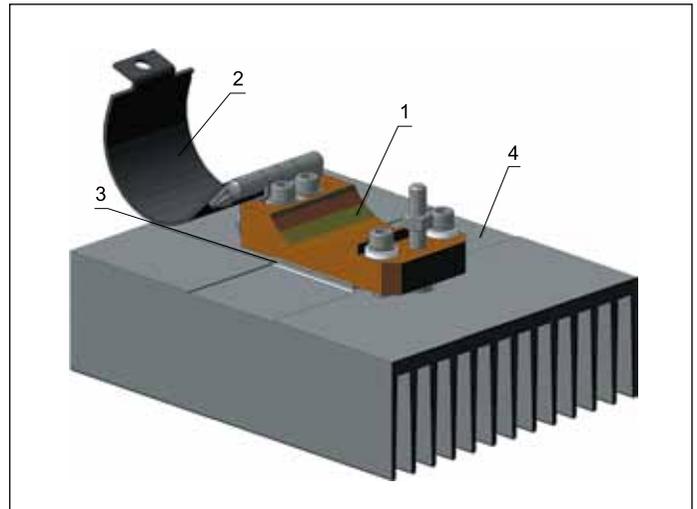


Рис. 9. Конструкция термоэлектрического генератора: 1 — теплоъемник; 2 — хомут для крепления генератора на трубе; 3 — ТГМ; 4 — радиатор

роховатостей соединяемых деталей заполняется теплопроводящей пастой, имеющей теплопроводность, многократно превосходящую воздух. Однако не следует забывать, что теплопроводность пасты в несколько раз хуже теплопроводности материалов конструкции, поэтому ее количество необходимо минимизировать для сохранения точек непосредственного механического контакта. Этого удается достичь, распределив максимально тонкий слой достаточно малого количества пасты, при этом в центре модуля желательно оставить большую толщину для дальнейшего выдавливания пасты к краям во время стяжки конструкции болтами. Так, для ТГМ, примененного в данной конструкции (40×40 мм), вполне достаточен объем пасты, равный по объему спичечной головке для каждой стороны модуля (рис. 10).

В конструкции предусмотрена развязка стягивающих болтов по тепловому потоку за счет применения капролоновых втулок.

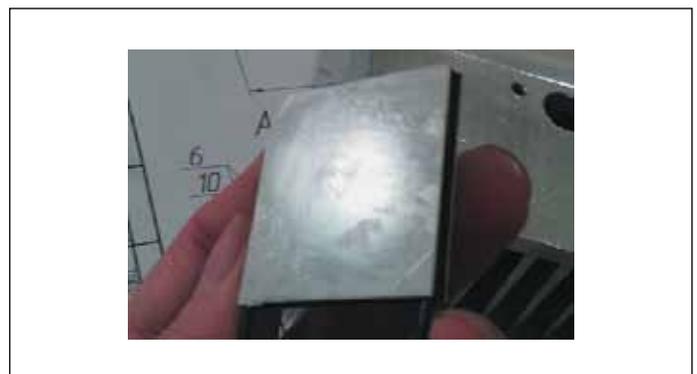


Рис. 10. Поверхность ТГМ с нанесенной теплопроводящей пастой перед установкой

Для упрощения установки генератора на объекте в конструкции предусмотрен его монтаж на трубе с помощью одного болта, закручиваемого со стороны монтажника (рис. 9). Это особо актуально при установке генератора на трубах, закрепленных в непосредственной близости к стене здания.

Перед установкой генератора на объекте требуется тщательно очистить трубу от краски, ржавчины и возможных неровностей (заусенцы, неровности металла и др.) — это необходимо для получения наибольшей теплопередачи. Так же как и при сборке самого генератора необходимо обеспечить максимально плотный контакт теплоъемника и трубы. Чем больше будет получено точек непосредственного соприкосновения генератора и металла трубы, тем больше тепла пройдет через генераторный модуль, тем большая мощность будет выработана генератором при прочих равных условиях (температуры теплоносителя, окружающей среды и др.). При установке генератора целесообразно применение теплопроводящей пасты вокруг мест соприкосновения трубы и теплоъемника, чтобы уменьшить воздушные зазоры.

Испытание опытного образца

Для проверки правильности проведенных расчетов описанная конструкция была изготовлена и испытана. Генератор установлен на отрезке трубы, закрепленной на стене с помощью кронштейнов с находящимся внутри него нагревателем. В качестве источника тепла использовалась лампа накаливания 220 В/60 Вт с регулятором напряжения. Это позволило регулировать температуру на трубе от комнатной температуры до +114 °С.



Рис. 11. Испытательный стенд

Вблизи горячей и холодной стороны ТГМ в отверстия, рассверленные в теплоъемнике и радиаторе холодной стороны были установлены термопары, позволившие контролировать значение температуры на ТГМ с помощью цифровых измерителей температуры (рис. 11).

Это позволило определить значение сопротивления нагрузки, при котором получается максимальная мощность, как произведение тока на напряжения, что происходит при равенстве при проведении испытаний был использован потенциометр с номинальным сопротивлением 10 Ом, включенный по схеме реостата. Для согласования нагрузки при проведении испытаний был использован потенциометр с номинальным сопротивлением 10 Ом, включенный по схеме реостата. Это позволило определить значение сопротивления, при котором получается максимальная мощность, как произведение тока на напряжения, что происходит при равенстве внутреннего сопротивления модуля суммарному сопротивлению внешней цепи (включая собственное сопротивление реостата-нагрузки).

В соответствии со справочными данными выбранный модуль имеет внутреннее сопротивление 6,5 Ом. Для определения фактического значения внутреннего сопротивления ТГМ был проведен ряд замеров значений тока в цепи и напряжения на нагрузке при изменении сопротивления нагрузки от 6 до 8,5 Ом. Результаты измерений приведены в таблице 2.

Полученное значение внутреннего сопротивления 7,1 Ом для примененного ТГМ лежит в пределах допустимого отклонения, указанного в спецификации ($\pm 10\%$). Также следует отметить, что в данном примере поиск значения внутреннего сопротивления происходил косвенным путем за счет проведения серии измерений вырабатываемой мощности вблизи ее максимума (точки перегиба), при этом разница для двух соседних от точки перегиба значений получилась в интервале 1%.

Определив величину согласованного сопротивления, выполним испытания генератора с имитацией различной температуры теплоносителя, для чего будем изменять мощность нагревателя при постоянной температуре окружающей среды +20 °С при фиксированном значении сопротивления нагрузки 7 Ом. Результаты испытаний приведены в таблице 3.

Полученный на рис. 12 график зависимости выходной мощности от разности температур схож с теоретической (квадратичной) функцией, представленной ранее на рис. 5.

Выводы

Сравнение полученных результатов с приведенными ранее зависимостями вырабатываемой электрической мощности на согласованной нагрузке генераторным модулем ТГМ-199-1,4-3,5 показывает близкое совпадение полученных и расчетных результатов лабораторных испытаний, приведенных

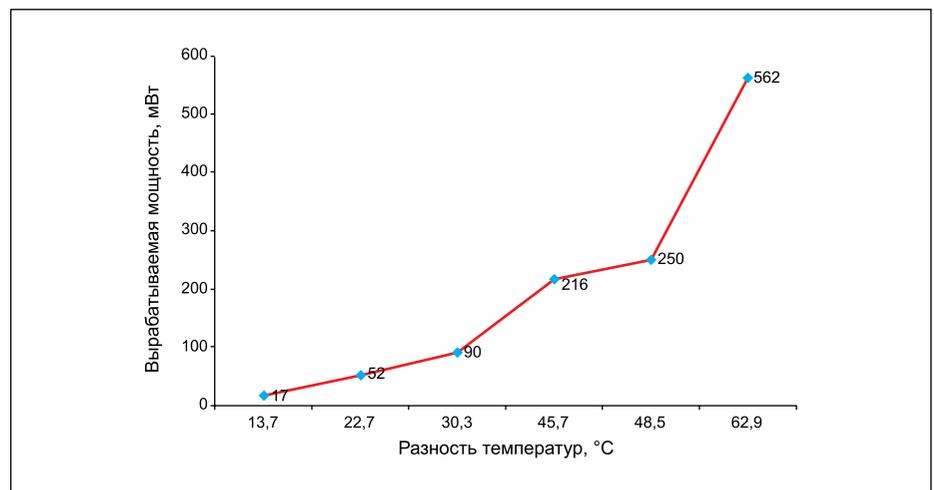


Рис. 12. Результаты измерений зависимости выходной мощности генератора от разности температур на ТГМ

Таблица 2. Результаты измерений

№ п/п	$T_{гор.}, ^\circ\text{C}$	$T_{хол.}, ^\circ\text{C}$	Разность температур	$R_{нагр.}$ номинальное, Ом	$U_{нагр.}$ В	$I_{нагр.}$ мА	$P_{нагр.}$ мВт	$R_{нагр.}$ расчетное, Ом
1	91,2	43	48,2	6,2	1,21	199,9	241,9	6,1
2	91,6	43,1	48,5	6,5	1,27	194	246,4	6,5
3	91,6	43,1	48,5	7	1,33	187,9	249,9	7,1
4	91,8	43,3	48,5	7,3	1,35	182,6	246,5	7,4
5	91,7	43,4	48,3	7,5	1,35	180,6	243,8	7,5
6	91,9	43,6	48,3	8	1,38	176	242,9	7,8
7	91,9	43,4	48,5	8,5	1,41	169,9	239,6	8,3

Таблица 3. Результаты испытаний вырабатываемой мощности при различных температурах теплоносителя

№ п/п	T _{гор.} , °C	T _{хол.} , °C	U, В	I, мА	P, мВт
1	43,1	29,4	0,33	50,2	17
2	55	32,3	0,58	89,3	52
3	66	35,7	0,77	117	90
4	85,5	39,8	1,19	181,5	216
5	91,6	43,1	1,33	187,9	250
6	114,7	51,8	2,01	280	562

на сайте компании «КРИОТЕРМ» в разделе «Испытания». При проектировании генератора его габаритные размеры были оптимизированы по отношению к источнику тепла, а также использован имеющийся радиатор холодной стороны с учетом соображений оптимизации габаритных размеров генератора. Полученная электрическая мощность достаточна для питания мало-мощных электронных устройств, может служить для зарядки аккумулятора (необ-

ходим повышающий DC/DC-конвертер). Применение радиатора с тепловым сопротивлением 0,25 К/Вт позволит понизить температуру холодной стороны до +30 °C и достичь мощности 0,5 Вт при температуре теплоносителя +90 °C. Этому может способствовать применение специальной латунной муфты со встроенным теплоъемником, уменьшающей тепловое сопротивление по горячей стороне конструкции при переходе на серийный выпуск.