

РАЗРАБОТКА ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ СЛАБОТОЧНЫХ СИСТЕМ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Ф. Ф. Хабиров, В. С. Вохмин

Современные научно-технологические решения в агропромышленном комплексе (АПК) открывают широкие возможности повышения энергетической эффективности отрасли. Особенно популярным автономным источником энергии может являться термоэлектрический генератор (ТЭГ), который работает от потерь тепла в тепловых сетях, в дымоотводных трубах и т.д. ТЭГ состоит из термоэлектрических модулей, количество которых зависит от необходимого выходного напряжения, он очень компактен, не имеет вращающихся частей. В связи с этим в данной статье производится сравнение технических характеристик, представленных производителем серийно выпускаемых термоэлектрических модулей, которые будут утилизировать тепловые потери теплотехнического оборудования, в том числе потери теплоты с уходящими газами на предприятиях АПК для автономного электроснабжения слаботоочных систем сельскохозяйственных предприятий. Основанием работы является предпосылка того, что тепло, которое получается от сгорания топлива с дымовыми газами, теряется в окружающей нас среде, но все же данные тепловые потери можно преобразовывать в электрическую энергию и использовать для автономного электроснабжения слаботоочных систем сельскохозяйственных предприятий. Для определения наиболее эффективных по получению электрической энергии термоэлектрических модулей была разработана экспериментальная установка ТЭГ. Перед разработкой конструкции ТЭГ были исследованы различные виды систем охлаждения, к которым относятся естественное и принудительное охлаждение, последнее оказалось наиболее эффективным в сравнении с естественным охлаждением. На разработанной модели ТЭГ с комбинированной системой охлаждения, которая включает в себя принудительную и естественную систему охлаждения, были сняты экспериментальные данные напряжения в зависимости от изменения температуры горячей воды в теплообменнике с нагреваемой стороны термоэлектрического модуля. Наибольший энергетический эффект разрабатываемой конструкции будет наблюдаться только при использовании принудительной системы охлаждения модулей. В процессе опытов проводились исследования на различных термоэлектрических модулях на способность получения термо-ЭДС, и был подобран наиболее подходящий термоэлектрический модуль для разработанной конструкции ТЭГ. По результатам работы установлено, что предложенную конструкцию ТЭГ для автономного энергоснабжения слаботоочных систем сельскохозяйственных предприятий, с учетом дальнейших доработок, можно использовать в качестве автономного источника энергии.

Ключевые слова: термоэлектрический генератор, термоэлектричество, система охлаждения, уходящие газы, слаботоочные системы.

В настоящее время все больше уделяется внимание энергосбережению, данный интерес связан с сокращением запасов традиционных источников энергии и ростом цен на них. Поэтому утилизация тепловой энергии с уходящими дымовыми газами, тепла канализационных стоков, тепла солнечных коллекторов и других может стать серьезной предпосылкой экономии энерго-ресурсов в современном сельском хозяйстве.

Для того чтобы утилизировать вышесказанные потери тепловой энергии и получить электрическую энергию, существует ограни-

ченный выбор низкотемпературных тепловых двигателей, работающих при температуре уходящих газов ниже 250 °С, к таким устройствам относятся: органический цикл Калины, двигатель Стирлинга, утилизационные котлы (УК), тепловые насосы, цикл Ренкина и термоэлектрические генераторы [6]. У представленных устройств, кроме последнего устройства, имеются подвижные части, которые периодически изнашиваются и выходят из строя, в связи с этим последнее более актуально для нас. Это связано с тем, что термоэлектрические генераторы не



имеют вращающихся механизмов и подвижных частей и являются преобразователями тепловой энергии без промежуточного звена напрямую в энергию электрическую.

Термоэлектрический генератор (ТЭГ) – это устройство, состоящее из термоэлектрических элементов (модулей), которые соединяются в последовательную или параллельную цепь и превращают тепловую энергию в энергию электрическую, используя эффект возникновения электродвижущей силы (ЭДС) за счет разницы температур проводников.

Термоэлектрический генератор возможно применить в разных сферах АПК для утилизации потерь тепловой энергии, но при выборе конструкции термоэлектрического генератора нужно учитывать, при каких температурах будет работать данная установка, так как при перегреве сторон термоэлектрических модулей выходное термо-ЭДС будет уменьшаться, в связи с этим необходимо обеспечивать данные устройства системой охлаждения.

Цель – сравнить технические характеристики и провести экспериментальные исследования серийно выпускаемых термоэлектрических модулей на предложенной конструкции термоэлектрического генератора с принудительной системой охлаждения, и выбрать наиболее эффективные по характеристикам термоэлектрические модули, для обеспечения электрической энергией слаботочные системы сельскохозяйственных предприятий.

Задачи:

– используя существующие термоэлектрические модули, опытным путем подобрать наиболее производительные термоэлектрические

модули для автономного энергоснабжения слаботочных систем сельскохозяйственных предприятий;

– разработать конструкцию ТЭГ, устанавливаемого на трубопроводах тепловых сетей или на дымоотводных трубах предприятий АПК для электроснабжения слаботочных систем.

Материалы и методы исследования

Исследования проводились при помощи общенаучных методов в рамках статического и логического анализа.

Были рассмотрены существующие термоэлектрические элементы производства КНР, цены которых намного доступнее, чем на рынках РФ или западных стран.

Изучив технические характеристики термоэлектрических модулей, выяснили, что модули разделяются на низко-, средне- и высокотемпературные с работой соответственно в диапазонах температур 20...300 °С, 300...600 °С и 600...1000 °С. Исходя их ценового диапазона, выбор остановился на низкотемпературных термоэлектрических модулях, что объясняется доступной стоимостью по сравнению со средне- и высокотемпературными термоэлектрическими модулями.

Технические характеристики подобранных для исследования низкотемпературных термоэлектрических элементов представлены в таблице 1.

Исходя из анализа существующих термоэлектрических элементов, самыми распространенными и доступными модулями являются ТЕС1-12703...ТЕС1-12715. По своим характеристикам модули предназначены для охлаждения,

Таблица 1 – Технические характеристики термоэлектрических модулей

Модель	Электрическая мощность, Вт	Напряжение питания, В	Размеры, мм	Сопротивление, Ом	Холодопроизводительность, Вт	Рабочая температура, °С
ТЕС1-12703	39	12	30×30×3,5	4,4	27	-50...+80
ТЕС1-12704	40	12	40×40×4	3,3	36	-55...+83
ТЕС1-12705	41	12		2,7	30	-55...+83
ТЕС1-12706	51,4	12		2,5	65	-55...+83
ТЕС1-12708	68,8	12		1,05	68,8	-50...+80
ТЕС1-12709	80,1	12	40×40×3,5	1,71	82	-55...+83
ТЕС1-12715	137	12		1,05	137	-30...+70
SP1848 27145 SA	–	12	40×40×4	–	–	-30...+120
TEP1-142T300	–	12	40×40×3,8	4,3	–	-40...+300

но также способны генерировать электрическую энергию при создании определенных температурных режимов. Также среди доступных термоэлектрических модулей были выявлены модули SP1848 27145 SA и TEP1-142T300, которые предназначены для генерации электроэнергии и работают на основе эффекта Зеебека. Данные элементы могут использоваться также и для охлаждения.

Перед работой над экспериментальной установкой были рассмотрены различные опубликованные исследования и конструкции термоэлектрических генераторов [1, 2, 3]. При анализе было выявлено, что в большой степени все исследования проводятся на экспериментальных установках с естественной системой охлаждения. Однако использование такого типа охлаждения не всегда способствует достижению нужной разницы температуры, чтобы постоянно вырабатывалось стабильное термо-ЭДС. Поэтому необходимо совершенствовать конструкцию системы охлаждения путем внедрения принудительной системы охлаждения.

В программе Компас 3D была разработана виртуальная модель термоэлектрического генератора, которая представлена на рисунке 1. Используя данную модель, была разработана физическая модель установки, на которой были проведены исследования термоэлектрических модулей.

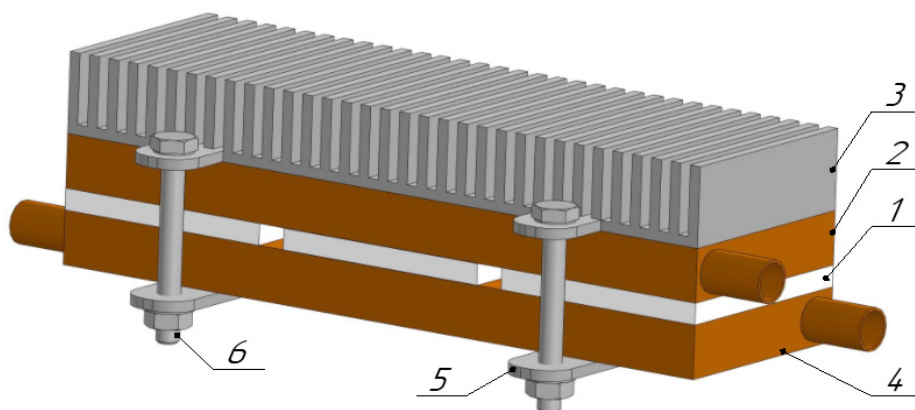
Принцип работы термоэлектрического генератора, представленного на рисунке 1, основан на том, что горячий теплоноситель будет

прокачиваться по медному теплообменнику, нагревая одну из сторон термоэлектрических модулей, а другая сторона модулей будет охлаждаться за счет принудительной прокачки через теплообменник охлаждающей жидкости. Тем самым будет создаваться требуемая разница температур между спаями термоэлектрических модулей, генерируя термо-ЭДС, которое можно накапливать в аккумуляторной батарее (АКБ) и использовать для собственных нужд. Для придания предлагаемой конструкции термоэлектрического генератора устойчивого положения производится затяжка пластин при помощи болтовых соединений.

Для проведения опытов на предложенной конструкции ТЭГ используются термоэлектрические модули, которые приведены в таблице 1. Первоначально исследовались по три модуля разных видов. Выберем термоэлементы с лучшими характеристиками, которые в дальнейшем будут устанавливаться на разработанной конструкции термоэлектрического генератора с принудительной системой охлаждения для питания слаботочных систем сельскохозяйственных предприятий.

Во время всех экспериментальных опытов использовался измерительный прибор-мультиметр ТЕК DT-835. При помощи данного измерительного прибора будут производиться измерения температуры, напряжения и тока.

Для создания принудительной циркуляции охлаждающей жидкости в медном теплообмен-



1 – термоэлектрические модули; 2 – медный теплообменник для прокачки охлаждающей жидкости; 3 – радиатор охлаждения; 4 – медный теплообменник для прокачки теплоносителя; 5 – стяжные пластины; 6 – болтовое соединение

Рис. 1. 3D-модель экспериментальной установки ТЭГ



нике был проведен обзор маломощных насосов, которые работают при напряжении 5 В, после сделанного анализа рынка был выбран насос Sailflo 5 В, напряжение питания которого составляет от 2,5 до 6 В, расход воды 80...120 л/ч.

Необходимо определить, сколько будет потреблять при прокачке жидкости насос Sailflo 5 В, чтобы понять, какая энергии будет затрачиваться на прокачку жидкости насосом.

После прокачки жидкости были получены ВАХ электродвигателя насоса Sailflo 5 В, построен график зависимости потребления тока с ростом напряжения, который представлен на рисунке 2.

После проведения опытов и анализа зависимости потребления тока насоса Sailflo 5 В было выяснено, что двигатель насоса начинает вращаться при значениях $U = 1,52$ В, $I = 55,7$ мА. Для наглядности понимания момент начала вращения электродвигателя насоса был указан оранжевым цветом на графике (рис. 2) на шкале напряжения и тока. С повышением напряжения будет увеличиваться объем перекачиваемой жидкости и соответственно расти потребление тока. В связи с тем, что питание насос будет получать от модулей, ограничим потребление насоса по проведенным исследованиям, которые представлены на рисунке 2. Проведя несколько опытов, перекачивая жидкость через экспериментальную установку (рис. 1), получили, что достаточное движение жидкости для охлаждения модулей находится в пределах от 2,4 до 3 В,

и при этом потребление тока составит приблизительно 93...130 мА.

Для получения стабильного значения напряжения нужно обратить внимание на то, как соединены термоэлементы между собой, выбрать подходящий вид соединения. От каждого термоэлектрического элемента не получится сгенерировать одинаковые выходные вольтамперные характеристики, это связано с неравномерностью прогрева и, конечно, с технологическим процессом изготовления модулей. При параллельном подключении термоэлектрические модули, у которых низкое напряжение, будут потреблять электроэнергию модулей, у которых большая выходная термо-ЭДС, тем самым начав работать в обратную сторону по эффекту Пельтье, нагревая одну сторону и охлаждая другую. Отсюда получили, что последовательное соединять термоэлектрические модули намного эффективнее и проще.

Для начала были проведены исследования по получению термо-ЭДС с термоэлектрическим модулем TEC1-12715, разработанный специально для холодильных установок. По полученным данным сделать вывод о возможности его использования в термоэлектрическом генераторе. Технические характеристики модуля TEC1-12715 можно посмотреть в таблице 1. Однако нужно отметить, что по температурному рабочему диапазону выбранный элемент не совсем подходит для нашей установки, так как предел его работы ограничен температурой

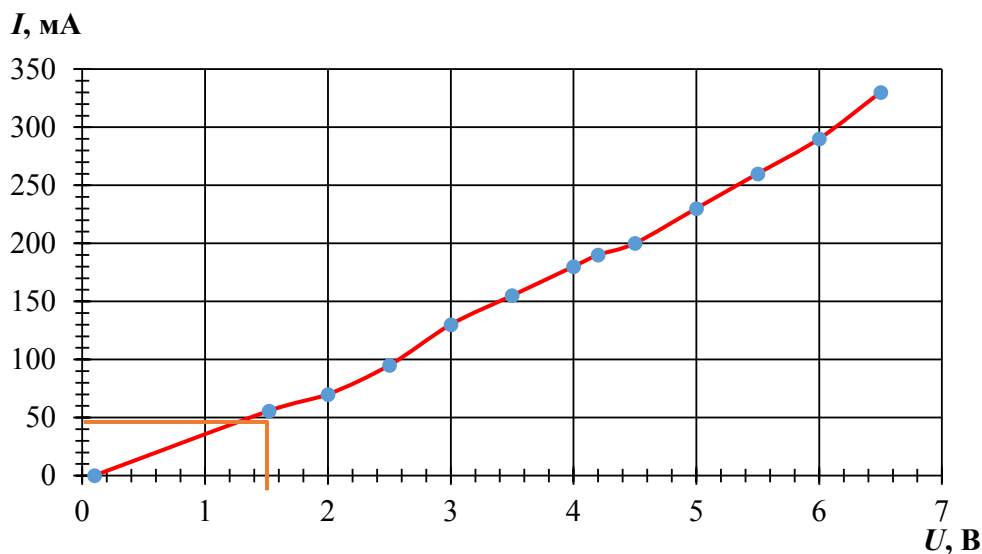


Рис. 2. График зависимости потребления тока насоса Sailflo 5 В с ростом напряжения

+70 °С. Даже если получатся неплохие результаты, то работать модули при высоких температурах долго не смогут. Связано это с тем, что р-п проводники модуля припаяны припоем, который имеет температуру плавления +80...+200 °С. Модули данной серии предназначены больше для охлаждения, поэтому при нагревании до температур свыше 70 °С имеется риск того, что припой расплавится и модуль выйдет из строя. Однако с целью сравнения опытных характеристик термоэлектрических модулей исследования с ними также будут проводиться. Для исследования используются три термоэлектрических модуля и повторяемость

опытов будет равна трем для достоверности получаемых данных, для нагрева одной из сторон модуля будет использоваться нагретая вода, а для охлаждения – принудительная перекачка холодной воды, тем самым и будет достигаться разность температур и генерироваться термо-ЭДС. После каждого опыта с термоэлектрическими модулями берется среднее значение полученных данных. Далее установив другой термоэлектрический модуль, были сняты характеристики на опытной установке, которые представлены на рисунке 3.

Термоэлектрический модуль с лучшими результатами представлен в таблице 2.

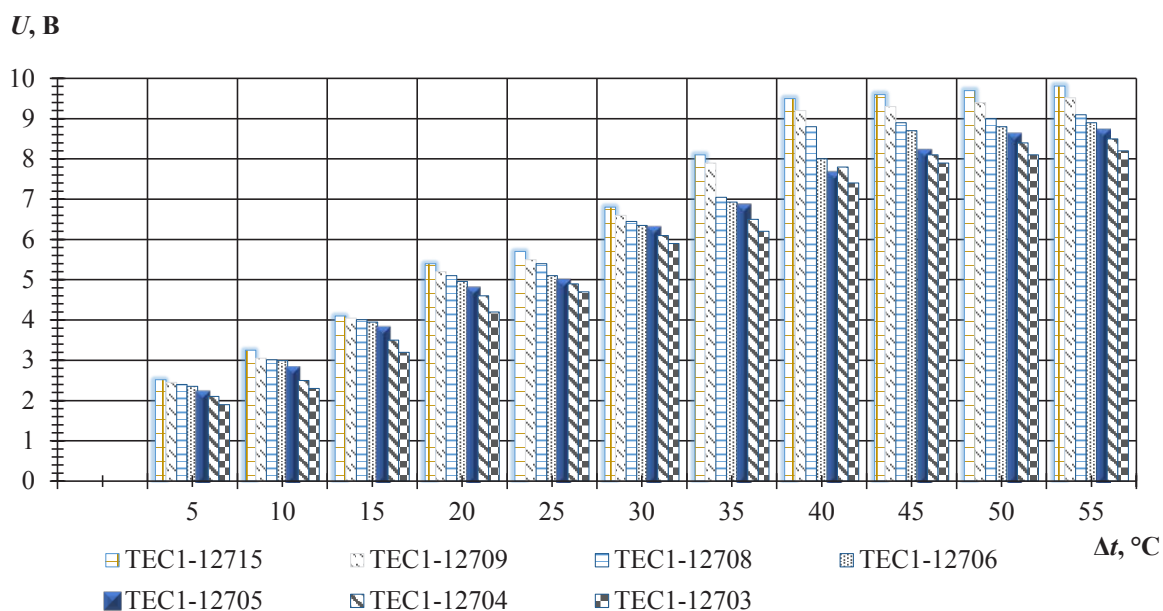


Рис. 3. График первого опыта получения термо-ЭДС при последовательном соединении 3 термоэлектрических модулей TEC1-12715-40, работающих без нагрузки

Таблица 2 – Получение термо-ЭДС при последовательном соединении трех термоэлектрических модулей TEC1-12715, работающих без нагрузки

Температура нижней пластины, °С	Температура верхней пластины, °С	Разница температур Δt, °С	Напряжение, В
14	13	1	0,85
18	13	5	2,52
25	15	10	3,25
35	15	15	4,1
39	19	20	5,4
45	20	25	5,7
51	21	30	6,8
57	22	35	7,4
62	22	40	8,02
68	23	45	9,04
75	25	50	9,5
89	34	55	9,81



Проведя серию опытов, было выяснено, что лучшие результаты были получены при использовании модулей типа TEC1-12715, на термоэлектрическом генераторе, представленном на рисунке 1, получаемое значение напряжение достигло $U = 9,81$ В при температуре на горячей стенке $89\text{ }^{\circ}\text{C}$, а с холодной стороны $34\text{ }^{\circ}\text{C}$, тем самым достигнув разницы температур в $55\text{ }^{\circ}\text{C}$. Но свыше $89\text{ }^{\circ}\text{C}$ греть горячую стенку термоэлектрического модуля не имеет смысла, это связано с техническими характеристиками модуля, как уже отмечалось выше.

Был рассмотрен термоэлектрический модуль SP1848 27145 SA. В отличие от модулей типа TEC1-12715, модуль SP1848 разработан именно для генерации электрической энергии.

Технические характеристики термоэлектрического модуля SP1848 27145 SA представлены в таблице 1. Получаемое термо-ЭДС при

разнице температур в диапазоне $20\dots 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ от производителя представлено в таблице 3.

При проведении эксперимента соединять модули SP1848 27145 SA требуется последовательно. Необходимо исследовать, сколько будет потреблять один модуль при случае, если будет применяться параллельное соединение и один из модулей начнет потреблять энергию для выработки холода и тепла.

Было рассмотрено потребление тока модулем SP1848 27145 SA в зависимости от приложенного к нему напряжения на графике, который представлен на рисунке 4, для получения достоверных данных исследования проводились три раза.

Рассмотрев полученную на рисунке 4 зависимость, видно, что даже при подаче низкого напряжения на модуль SP1848 27145 SA потребление тока значительное. В зависимости

Таблица 3 – Технические характеристики от производителя термоэлектрического модуля SP1848 27145 SA

Разница температур между верхней и нижней пластиной, $^{\circ}\text{C}$	Напряжение разомкнутой цепи, В	Генерируемый ток, мА
20	0,97	225
40	1,8	368
60	2,4	469
80	3,6	558
100	4,8	669

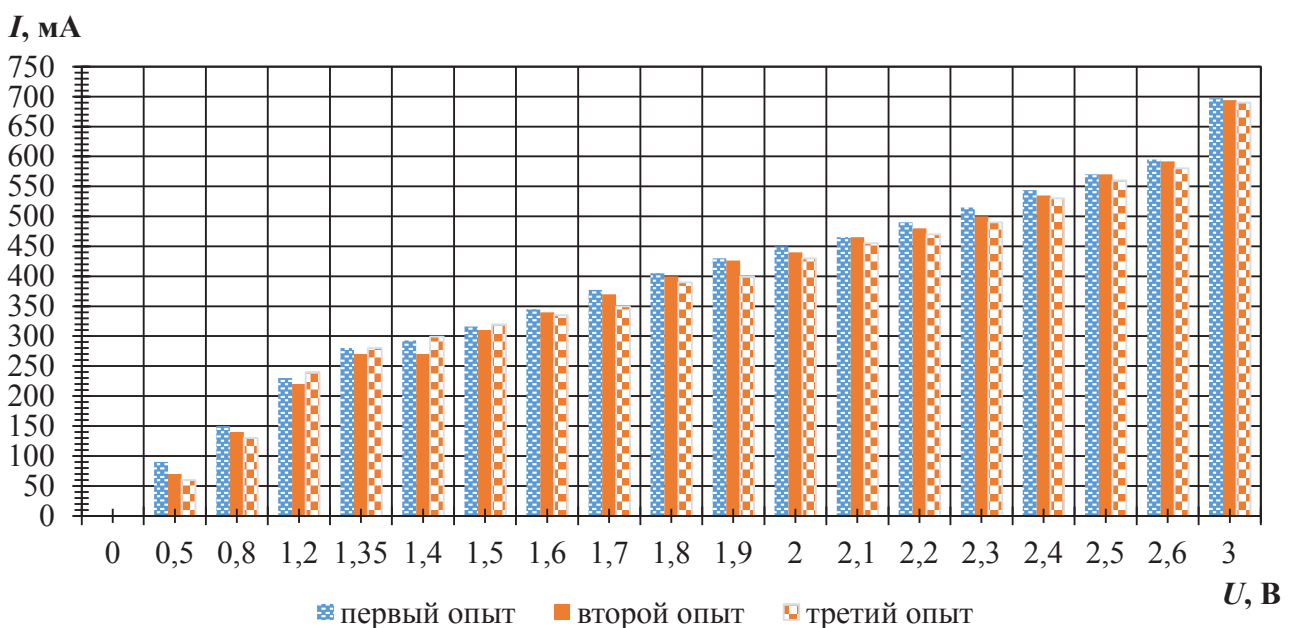


Рис. 4. График потребления тока модулем SP1848 27145 SA в зависимости от приложенного напряжения

от вида соединения модуль с меньшим напряжением в цепи при параллельном соединении будет потреблять четвертую часть получаемого тока от термоэлектрического модуля. Проведя исследования по наиболее подходящему виду соединения, определили, что для нашей разрабатываемой конструкции ТЭГ лучше подойдет последовательное соединение элементов. Генерируемое напряжение будет суммироваться, не воздействуя на модули, которые находятся в электрической цепи.

После исследования характеристик модуля определялось, сколько же энергии сгенерируется при использовании термоэлектрического

генератора без потребителей, который состоит из трех последовательно соединенных термоэлектрических модулей. Насос для принудительной циркуляции будет запитан от внешнего источника питания. Результаты проведенных опытов представлены на рисунке 5.

Было сделано сравнение напряжения для одного модуля, полученное опытным путем, с тем, что приводится в технических характеристиках производителя.

После проведения экспериментальных опытов было получено, что наиболее подходящий термоэлектрический модуль типа TEC1-12703...TEC1-12715. Наилучший результат

Таблица 4 – Технические характеристики от производителя термоэлектрического модуля ТЕР1-142Т300

Разница температур между верхней и нижней пластиной, °С	Напряжение разомкнутой цепи, В	Генерируемый ток, мА
40	2,2	390
60	3,6	489
80	4,8	569
100	6,0	658
120	7,2	759
140	8,4	969

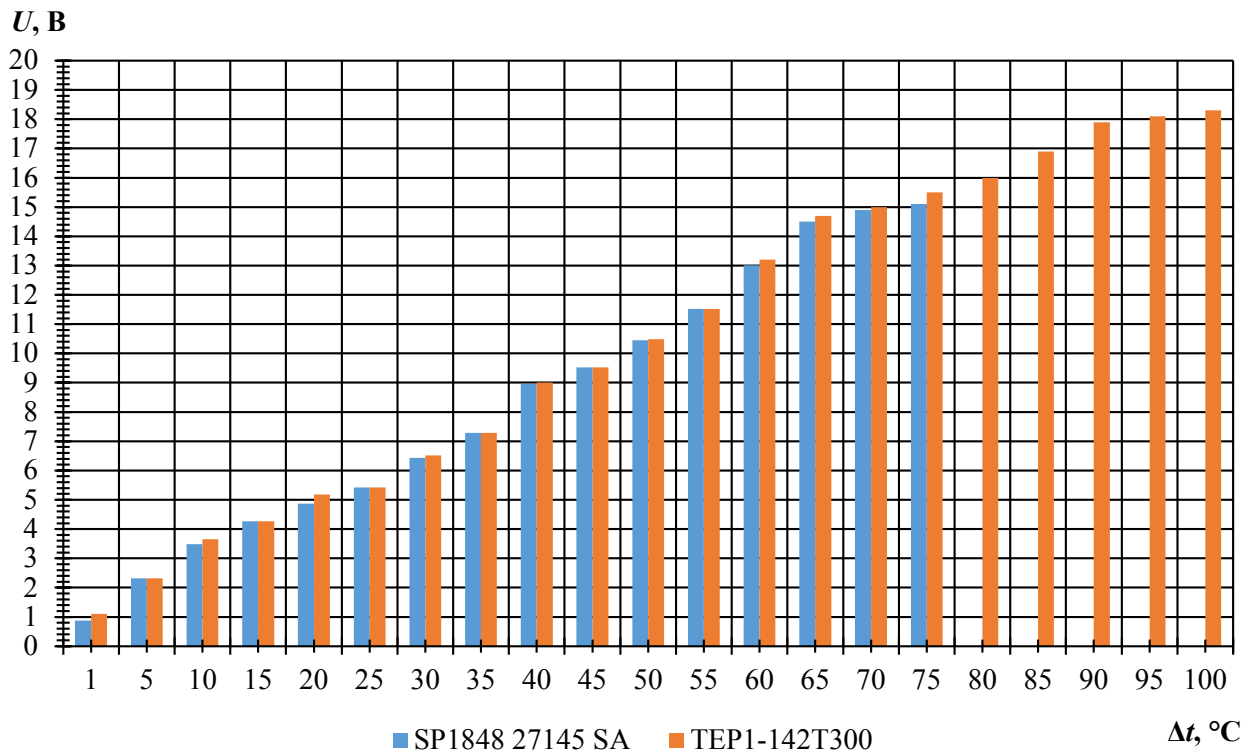


Рис. 5. Получение термо-ЭДС при последовательном соединении 3 термоэлектрических модулей SP1848 27145 SA, TEP1-142T300, работающих без нагрузки



получаемого напряжения достиг $U = 9,81$ В, при температуре на горячей стенке 89 °С, а с холодной стороны 34 °С, тем самым достигнув разницы температур в 55 °С. Однако свыше 89 °С греть горячую стенку термоэлектрического модуля не имеет смысла, это связано с техническими характеристиками модуля, так как он может выйти из строя.

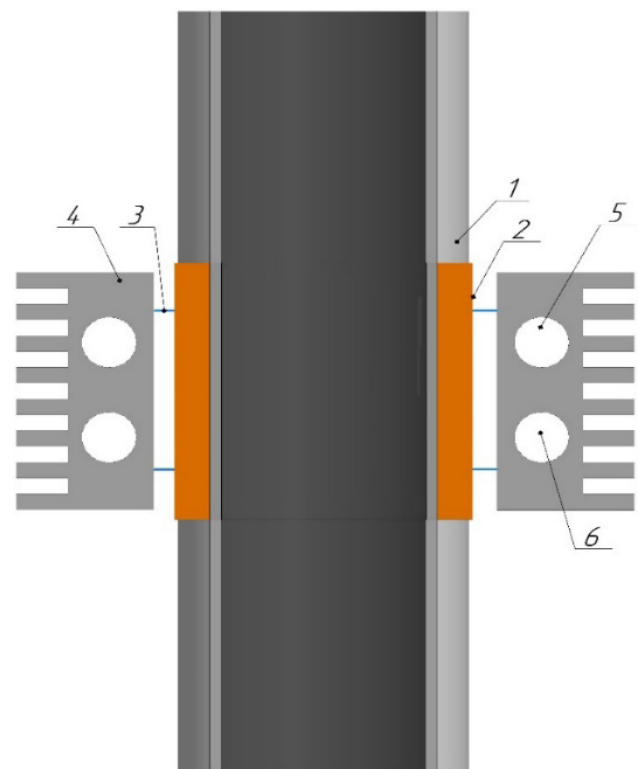
Далее были проведены опыты с термоэлектрическими модулями типа SP1848 27145 SA и TEP1-142T300, которые предназначены для генерации электрической энергии. Результаты при использовании модуля SP1848 27145 SA составили $U = 15,1$ В, при разнице температур $\Delta t = 75$ °С. Лучший результат показал модуль TEP1-142T300, результаты которого составили $U = 17,1$ В, при разнице температур $\Delta t = 75$ °С. Хотя модуль TEP1-142T300 и имеет лучшие характеристики, но все же имеет недостаток, который отражается в его высокой стоимости.

Результаты и обсуждение

Исходя из анализа полученных результатов и сравнения технических характеристик исследуемых термоэлектрических модулей, были получены лучшие результаты от модуля TEP1-142T300. Однако стоимость этого модуля в разы выше, чем у других рассматриваемых модулей. Поэтому для предлагаемой конструкции было решено использовать модуль SP1848 27145 SA, так как его характеристики подходят для выработки электроэнергии для слаботочных систем сельскохозяйственных предприятий. Его технические характеристики позволяют применять его при высоких температурах. Полученную электроэнергию можно использовать для питания автоматизированной системы контроля и учета электроэнергии, в том числе автоматизированной системы управления диспетчеризации инженерного оборудования здания и т.д.

После обсуждения результатов и определившись с термоэлектрическими модулями была спроектирована конструкция ТЭГ с принудительной системой охлаждения для питания слаботочных систем.

После рассмотрения предлагаемой конструкции ТЭГ с принудительной системой охлаждения была разработана структурная схема термоэлектрического генератора, представленная



1 – стальная труба; 2 – медные пластины;
3 – термоэлектрический модуль; 4 – радиаторы охлаждения; 5, 6 – подающий и обратный канал хладоносителя

Рис. 6. Предлагаемая конструкция ТЭГ

Таблица 5 – Сравнение измеренного напряжения и напряжения, представленного производителем

Разница температур Δt , °С	Напряжение модуля SP1848 по данным производителя U , В	Измеренное модуля SP1848 напряжения U , В	Напряжение модуля TEP1-142T300 по данным производителя U , В	Измеренное модуля TEP1-142T300 напряжения U , В
20	0,97	1,62	2	1,72
40	1,8	2,98	2,2	3,0
60	2,4	4,0	3,6	4,03
80	3,6	–	4,8	5,2
100	4,8	–	6,0	5,7

на рисунке 7, которая работает следующим образом: электроэнергия, полученная от термоэлектрического генератора, поступает на стабилизатор напряжения, далее поступает на контроллер напряжения, который заряжает аккумуляторную батарею, далее поступает на инвертор, где постоянное напряжение преобразуется в переменное. После контроллера напряжения электроэнергия может поступать в инвертор для преобразования и далее поступает потребителям, к приемнику или напрямую питать насос, который будет осуществлять принудительную циркуляцию охлаждающей жидкости. На термоэлектрическом генераторе установлены датчики температуры на холодной стороне стенки и на горячей, для контроля температурных показателей.

Выводы

Рассмотрев и изучив теоретический материал и проведя экспериментальные исследования на разработанной физической модели ТЭГ:

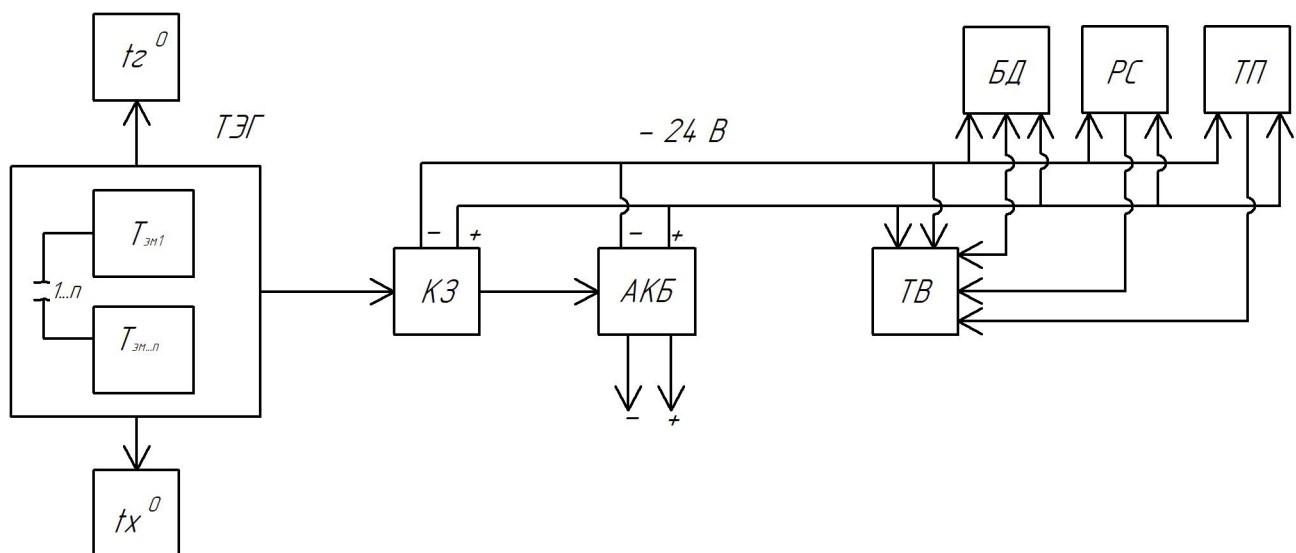
– был выбран термоэлектрический модуль SP1848 27145 SA. При использовании трех термоэлектрических модулей, которые были соединены последовательно, полученное среднее значение напряжения составило $U = 15,1$ В, при разнице температур $\Delta t = 75$ °С;

– выяснено, что для получения стабильного значения термо-ЭДС необходимо использовать принудительную и естественную систему охлаждения совместно;

– была разработана конструкция термоэлектрического генератора с принудительной системой охлаждения, предложена структурная схема для питания слаботочных систем сельскохозяйственных предприятий.

Список литературы

1. Пат. 150186 Российская Федерация: МПК H01L 35/28. Термоэлектрический генератор / С. И. Плеханов, А. Я. Терекоев, В. Э. Новиков, И. Ю. Попов ; заявитель и патентообладатель Москва, ОАО НПП «Квант» ; заявл. 10.09.2013 ; опубл. 10.02.2015, Бюл. № 4. 12 с.
2. Пат. 171132 Российская Федерация: МПК H01L 35/00. Термоэлектрический генератор / Е. С. Будеева, Е. В. Костарев ; заявитель и патентообладатель Челябинск, ЗАО «ЭМИС» ; заявл. 07.12.2016 ; опубл. 22.05.2017, Бюл. № 15. 9 с.
3. Пат. 2755980 Российская Федерация: МПК H01L 35/30. Термоэлектрический генератор с принудительной системой охлаждения / В. С. Вохмин, Ф. Ф. Хабиров ; заявитель и патентообладатель Уфа, ФГБОУ ВО Башкирский



ТЭГ – термоэлектрический генератор; $t_{г}$ – датчик температуры горячей стенки; $t_{х}$ – датчик температуры холодной стенки; КЗ – контроллер заряда; АКБ – аккумуляторная батарея; Инв. – инвертор; ТВ – тепловычислитель; ТП – термопреобразователь; РС – расходомеры-счетчики; БД – беспроводная передача данных

Рис. 7. Структурная схема термоэлектрического генератора для электропитания слаботочных систем



государственный аграрный университет ; заявл. 01.10.2021 ; опубл. 23.09.2021, Бюл. № 27. 8 с.

4. Хабиров Ф. Ф., Вохмин В. С. Обоснование применения термоэлектрического генератора в системе дымоотведения котельной // Инновации в сельском хозяйстве. 2019. № 3 (32). С. 285–292.

5. Montecucco A., Siviter J., Knox A. R. A combined heat and power system for solid-fuel stoves using thermoelectric generators // Energy Procedia. 2015. № 75. P. 597–602. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.07.462.

6. Analysis of a wooden pellet-fueled domestic thermoelectric cogeneration system / K. Alanne, T. Laukkanen, K. Saari, J. Jokisalo // Appl Therm Eng. 2014. № 63. P. 1–10. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2013.10.054.

7. Song L., Richard S., Rui C. Performance comparison of a thermoelectric generator applied in conventional vehicles and extended-range electric vehicles. DOI: 10.1016/j.enconman.2022.115791.

Хабиров Фидан Фазитович, аспирант, направление «Технологии, средства механизации и энергетическое оборудование в сельском, лесном и рыбном хозяйстве», ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет».

E-mail: fidan.20@mail.ru.

Вохмин Вячеслав Сергеевич, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Электрические машины и электрооборудование», ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет».

E-mail: v_vohmin@mail.ru.

* * *