

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВРЕМЕННОЙ ДИНАМИКИ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ОХЛАДИТЕЛЕЙ В Z-МЕТРИИ

Володин В.В.¹, Драбкин И.А.², Ершова Л.Б.¹, Кондратьев Д.А.¹.

¹Институт Физики и Высоких Технологий, Москва,

²Институт Химических Проблем Микроэлектроники, Москва, Россия

Факс: 132-5870

1. Введение

Временные характеристики термоэлектрического охладителя (ТЭО) являются важными рабочими параметрами для любого устройства, в котором они используются, и способы их расчетного и экспериментального определения весьма актуальны. В работе [1] были теоретически рассмотрены нестационарные процессы в единичной термоэлектрической ветви в регулярном режиме [2] и полученные формулы обобщены на случай однокаскадных ТЭО с различной тепловой нагрузкой. В работе [3] выведены выражения для временной релаксации одно- и двухкаскадных ТЭО и обобщены на случай многокаскадных ТЭО с различной тепловой нагрузкой и в разных условиях эксплуатации. Данная работа ставит своей целью исследовать характер переходных процессов при измерении термоэлектрической добротности в Z-метре, сравнить результаты с теорией [3] и получить метод оценки времени релаксации в реальных термоэлектрических устройствах.

2. Теоретические выражения для констант времени ТЭО

Определим время релаксации модуля как время, в течение которого разность температур между начальным и стационарным состоянием уменьшается в e раз. В работе [3] рассматривается ряд нестационарных задач, и, путем решения соответствующих дифференциальных уравнений находятся выражения для максимальных времен релаксации, описывающих самые медленные экспоненциальные процессы. Условие, накладываемое на ток, текущий через ветви ТЭО:

$$j << \frac{\alpha L}{\kappa_0}, \quad (1a)$$

где j – плотность тока, протекающего через ветвь, α – коэффициент Зеебека, κ_0 – удельная теплопроводность материала ветвей, L – высота ветви. Выражение (1) равносильно тому, что ток через ТЭО должен быть много меньше максимального I_{max} –тока через ТЭО, при котором модуль при нулевой холодопроизводительности обеспечивает максимально возможную разность температур:

$$I << I_{max}, \quad (1b)$$

Рассмотрены следующие случаи.

1) Однокаскадный ТЭО с термостатированной горячей стороной и адиабатически изолированной холодной:

$$\tau_{max} = \frac{LC_1}{\left(1 + \frac{L\alpha j}{\kappa_0}\right) s_0 \kappa_0 N}, \quad (2)$$

где C_1 – теплоемкость коммутационных шин и теплоперехода, а также устройств, которые охлаждаются термоэлектрическим модулем; N – количество ветвей в модуле, s_0 – площадь поперечного сечения ветви.

2) Однокаскадный ТЭО, холодный и горячий теплопереходы которого находятся в постоянном теплообмене с окружающей средой:

$$\tau_{max} = \frac{C_1 C_2 L}{(C_1 + C_2) \kappa_0 N s_0}, \quad (3)$$

где C_1, C_2 – теплоемкости всех элементов на холодном и горячем теплопереходах соответственно.

Выражение (3) есть максимальное время релаксации модуля, полученное в приближении $j=0$. С помощью компьютерной обработки соответствующее время релаксации находится и при ненулевых токах.

Для случая свободного модуля это время оказывается приблизительно в два раза меньше, чем для модуля с термостатируемым горячим теплопереходом, см. (2).

3) Двухкаскадный ТЭО с термостатированной горячей стороной и адиабатически изолированной холодной. Для такого варианта имеем проявление двух экспоненциальных процессов – медленного и быстрого – с временными константами соответственно:

$$\tau_{max} \approx \tau_{1max} + \tau_{2max}, \quad (4a)$$

$$\tau = \frac{\tau_{max1} \tau_{max2}}{(\tau_{max1} + \tau_{max2})} \quad (4b)$$

Здесь τ_{1max} и τ_{2max} – максимальные времена для однокаскадных модулей, образованных из каждого каскада.

Тогда времена релаксации n -каскадного модуля можно выразить как сумму времен релаксации каждого из каскадов и всевозможные комбинации времен релаксации каскадов по аналогии с (4б):

$$\tau_{max} \approx \tau_1 + \tau_2 + \dots + \tau_n, \quad (5a)$$

$$\tau_{ij} = \frac{\tau_{maxi} \tau_{maxj}}{(\tau_{maxi} + \tau_{maxj})} \quad \forall i, j \quad (5b)$$

3. Измерение константы времени

Прибор DX3065 позволяет измерять параметры ТЭО как на воздухе, так и при осуществлении эффективного теплоотвода с горячей стороны ТЭО, то есть для ТЭО, встроенного в корпус. При этом прибор выполняет двойную функцию. С одной стороны, он позволяет измерять термоэлектрическую добротность Z ТЭО по методу Хармана [4]. Однако, так как этот метод основан на балансных уравнениях, что справедливо лишь для времен, много больших чем характеристическое время системы, прибор предоставляет возможность оценивать последнее. Таким образом, объединенный Z -метр и τ -метр (для дальнейшей краткости Z -метр), а также сопутствующее программное обеспечение позволяют вывести телеметрические данные выхода ТЭО в стационарный режим при измерении временного поведения термо-ЭДС $U_{\alpha}(t)$, обработать эти данные с помощью интерполяции единой экспонентой и оценить время релаксации ТЭО при разных токах:

$$U_{\alpha}(t) = Ust_{\alpha}(1 - e^{-t/\tau}), \quad (6)$$

где Ust_{α} - стационарное значение термо-ЭДС.

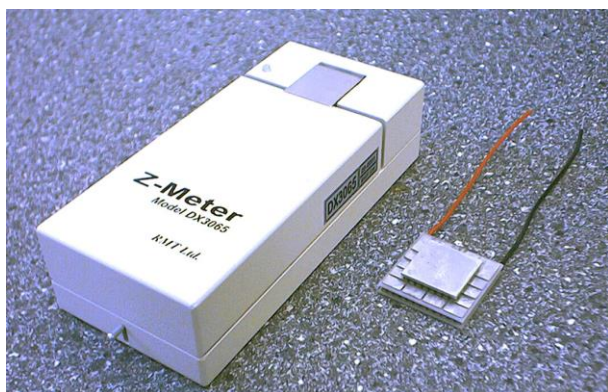


Рис. 1. Внешний вид Z-метра.

Для проверки правильности аппроксимации одной экспонентой можно дополнительно исследовать следующую функцию:

$$f(t) = \ln\left(\frac{Ust_{\alpha} - U(t)}{Ust_{\alpha}}\right), \quad (7)$$

что оказывается важным при измерении многокаскадных ТЭО.

4. Однокаскадные ТЭО: эксперимент и теория

Здесь приведены экспериментальные и расчетные [3] данные для однокаскадных ТЭО как со свободными теплопереходами, так и с термостатированным горячим теплопереходом. I – электрический ток, текущий через ТЭО, τ_{exp} , τ_{theory} – экспериментально и теоретически полученные времена

релаксации, D – безразмерное среднеквадратическое отклонение, нормализованное к стационарному значению термо-ЭДС. В расчетах здесь и далее использовались следующие параметры: теплоемкость термоэлектрического материала 0,13 Дж/г, плотность – 7,5 г/см³, для керамики – 0,8 Дж/г и 3,5 г/см³, для припоя – 0,17 Дж/г и 9,3 г/см³, толщина керамики 0,5мм.

Таблица 1.

Параметры измеренных ТЭО

Тип ТЭО	Размеры тепло- переходов, ммхмм		S_0 , мм ²	L, мм	N	I _{max} , А
	Cold	Hot				
1MT03-004-13	2,0x1,0	2,3x2,3	0,09	1,3	8	0,3
1MC04-032-15	6,4x6,4	6,4x8,0	0,16	1,5	64	0,5
1MC06-030-05	8,2x8,2	8,2x8,2	0,36	0,5	60	3,2
1MC06-060-05	10,0x12,0	12,0x12,0	0,36	0,5	120	3,2
1MC06-018-15	6,0x6,0	6,0x8,0	0,36	1,55	36	1,1
1MC06-024-15	8,0x8,0	8,0x8,0	0,36	1,55	48	1,1
1MT04-059-16	8,0x7,0	8,0x7,0	0,16	1,6	118	0,45

Измерения и расчеты проводились при двух значениях тока 5мА и 25 мА. Из таблицы 1 видно, что эти токи удовлетворяют условию (16).

Таблица 2.

Измеренные и расчетные константы времени однокаскадных ТЭО со свободными теплопереходами

Тип ТЭО	I, мА	τ_{exp} , с	D	τ_{theory} , с
1MT03-004-13	5	2.43	0.0018	1.92
	25	2.55	0.0007	2.87
1MC04-032-15*	5	3.2	0.0003	2.56
	25	3.14	0.0001	3.53
1MC06-030-05*	5	0.75	0.0012	0.815
	25	0.71	0.0003	0.815
1MC06-060-05	5	0.68	0.0009	0.795
	25	0.65	0.0002	0.795
1MC06-018-15*	5	2.23	0.0007	2.56
	25	2.26	0.0002	2.57
1MC06-024-15	5	2.44	0.0005	2.56
	25	2.47	0.0002	2.95
1MT04-059-16	5	2.47	0.0002	2.91
	25	2.50	0.0001	2.91

Знаком «*» в таблице 2 помечены ТЭО, измеренные также с термостатированным горячим теплопереходом – см. таблицу 3.

Таблица 3

Измеренные и расчетные константы времени однокаскадных ТЭО с термостатированным горячим теплопереходом

Тип ТЭО	I, мА	τ_{exp} , с	D, мВ	τ_{theory} , с
1MC04-032-15*	5	6.1	0.0057	6.59
	25	5.77	0.0098	6.43
1MC06-030-05*	5	1.28	0.0036	1.65
	25	1.45	0.0062	1.64
1MC06-018-15*	5	3.96	0.0049	4.77
	25	3.96	0.0071	4.71

Видно, что времена релаксации для свободного модуля, действительно, приблизительно в два раза меньше, чем для модуля с термостатируемым горячим теплопереходом.

Типичные телеметрические данные измерений приведены на рис.2.

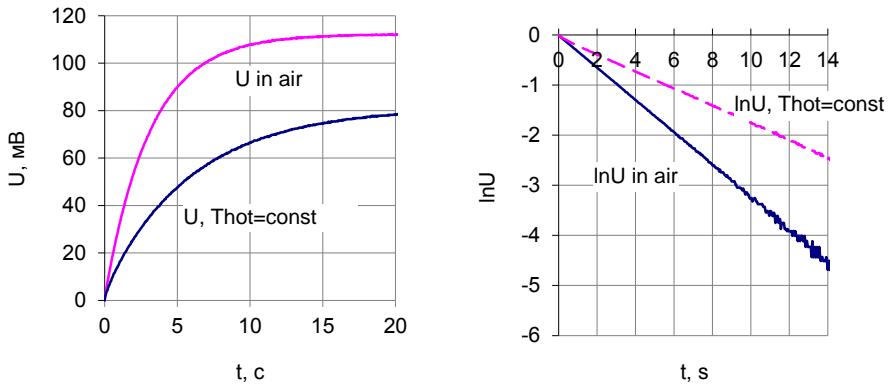


Рис. 2. Измеренные значения термо-ЭДС для ТЭО 1MC04-032-15 при 25мА

Данные в логарифмическом масштабе зависят от времени линейно. Соответствующие времена релаксации, найденные из линейной аппроксимации дают 3с и 5.5с, что находится в хорошем согласии с результатами таблиц 2, 3. Видно, что описание временного поведения однокаскадного ТЭО с помощью одного характерного времени релаксации является хорошим приближением.

5. Двух- и трехкаскадные ТЭО: эксперимент и теория

Расчеты для многокаскадных ТЭО проводились при токе 5мА только для случая термостабилизации горячей стороны. Измерения проводились при 5 мА как для этого случая, так и для свободного ТЭО. Параметры испытанных двухкаскадных ТЭО приведены в таблице 4.

Таблица 4.

Параметры двухкаскадных ТЭО

Тип ТЭО	Размеры теплопереходов, ммхмм			$s_{0,2}$ мм ²	l, мм	N ₁	N ₂	I _{max} , А
	Cold	Medium	Hot					
2МС06-10-10	3,2х3,2	4,0х4,0	4,0х4,0	0,36	1,05	6	14	1,3
2МС04-039-15	4,9х4,9	6,5х6,5	6,5х6,5	0,16	1,55	36	42	0,3

Приведем результаты расчетов.

Таблица 5.

Расчетные данные для двухкаскадных ТЭО для случая
термостатированного горячего теплоперехода

Тип ТЭО	τ_1 , с	τ_2 , с	$\tau_1 + \tau_2$, с	$\tau_1 \tau_2 / (\tau_1 + \tau_2)$, с
2МС06-10-10	5.04	3.53	8.57	2.07
2МС04-039-15	6.83	9.80	16.63	4.02

Видно, что временная релаксация для двухкаскадных ТЭО должна выявлять быструю и медленную составляющую, и описывать этот случай с помощью одной экспоненты можно только в качестве оценки. Проанализируем, насколько она приемлема. В таблице 7 приведены экспериментальные результаты.

Таблица 7.

Экспериментальные результаты для двухкаскадных ТЭО

Тип ТЭО	Свободные теплопереходы		Термостатированные теплопереходы	
	τ_{exp} , с	D	τ_{exp} , с	D
2МС06-10-10	3.1	0.0012	5.02	0.0011
2МС04-039-15	9.3	0.0007	12.5	0.0001

Рассмотрим временные экспериментальные зависимости для ТЭО 2МС04-039-15. На рис. 3 приведены зависимости термо-ЭДС от времени для двух вариантов теплообмена горячей стороны.

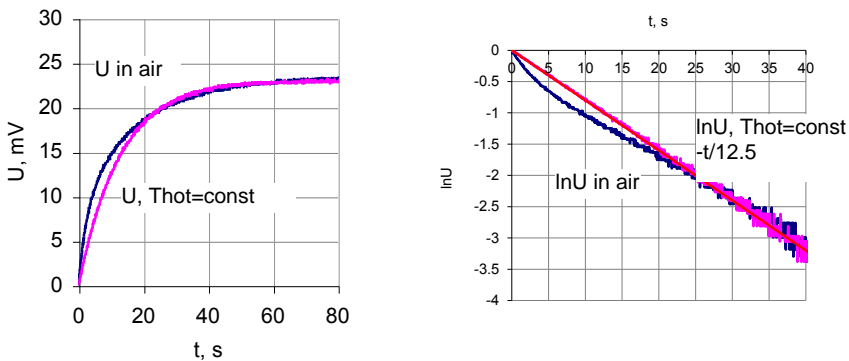


Рис. 3. Измеренные значения термо-ЭДС для ТЭО 2МС04-039-15 при 5мА

Видно, что для варианта термостатированного горячего теплоперехода логарифмическая зависимость несет линейный характер. Это означает, что при термостатировании максимальная суммарная константа времени оказывается много больше констант, описывающих быстрые процессы, связанные с нетермостабилизированным каскадом. Для ТЭО со свободными поверхностями это уже несправедливо.

На рисунке 4 обработана логарифмическая временная зависимость для ТЭО на воздухе.

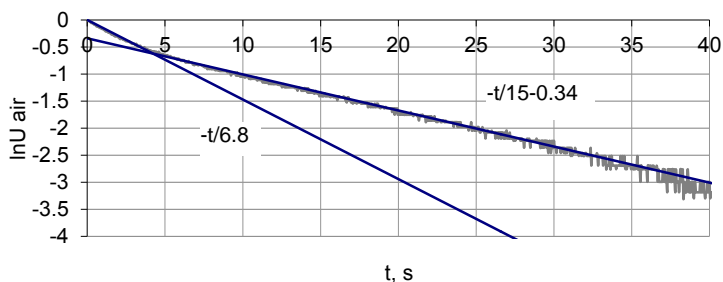


Рис. 4. Логарифмическая релаксационная кривая для ТЭО 2МС04-039-15 при 5мА со свободными теплопереходами.

Видно, что константы времени, определенные логарифмически: $\tau=15\text{с}$ $\tau=6.8\text{с}$, лишь в среднем дают результат таблицы 7.

Проведем аналогичный анализ случая трехкаскадного ТЭО. Параметры испытанных двухкаскадных ТЭО приведены в таблице 8.

Таблица 8.

Тип ТЭО	Размеры теплопереходов, ммхмм			$S_{0,2}$ мм ²	l, мм	N_1	N_2	N_3	I _{max} , А
	Cold	Medium	Hot						
ЗМС06-024-13	2.5x2.5	4,0x4,0, 6.1x6.1	6.1x6.1	0.36	1.3	6	14	32	1.05
ЗМС07-098-115	8x8	10x10, 12x12	12x12	0.49	1.15	36	42	132	1.45

Приведем результаты расчетов.

Таблица 9.

Расчетные данные для трехкаскадных ТЭО в случае термостатированного горячего теплоперехода

Тип ТЭО	$\tau_1, \text{с}$	$\tau_2, \text{с}$	$\tau_3, \text{с}$	$\tau_1+\tau_2+\tau_3, \text{с}$
ЗМС06-024-13	6.11	5.32	4.73	16.16
ЗМС07-098-115	9.54	5.32	3.08	17.94

В случае трехкаскадного модуля кроме медленной эволюции, описываемой суммарной константой времени должны иметь место еще три более быстрых переходных процесса в соответствии с (56). Усредненные

экспериментальные данные, полученные регрессией одиночной экспоненты, даны в таблице 10.

Таблица 7.

Экспериментальные результаты для трехкаскадных ТЭО

Тип ТЭО	Свободные теплопереходы		Термостатированные теплопереходы	
	$\tau_{\text{exp}}, \text{c}$	D	$\tau_{\text{exp}}, \text{c}$	D
ЗМС06-024-13	5.9	0.0009	11.2	0.0005
ЗМС07-098-115	4.1	0.0006	8.7	0.0003

Оба ТЭО оказываются очень чувствительными к изменению условий на горячей стороне, что может быть связано с большими каскадными коэффициентами для того и другого модуля (см. аналогичный случай для ЗМС06-10-10, таблица 7).

Рассмотрим временные экспериментальные зависимости для ТЭО ЗМС06-024-13. На рис. 5 приведены зависимости термо-ЭДС от времени для двух вариантов теплообмена горячей стороны.

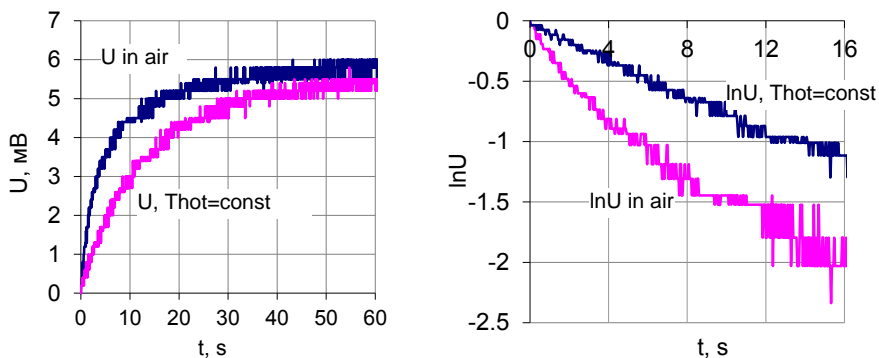


Рис. 5. Измеренные значения термо-ЭДС для ТЭО ЗМС06-024-13 при 5мА

Видно, что выявленная для двухкаскадного случая закономерность остается справедливой. Это иллюстрирует рис. 6.

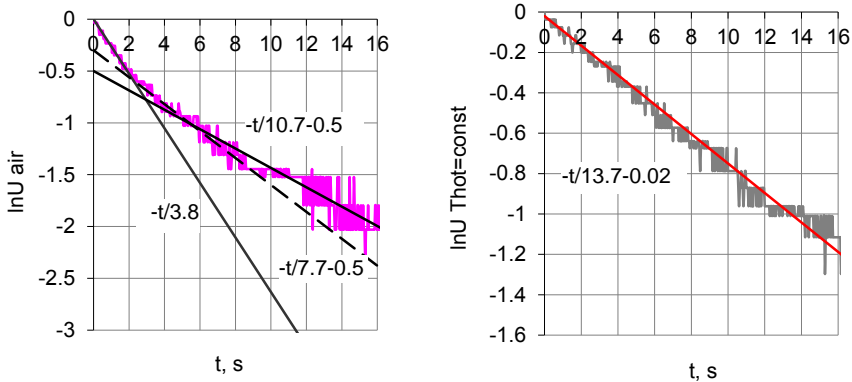


Рис. 6. Логарифмические релаксационные кривые для ТЭО ЗМС06-024-13 при 5мА со свободными и термостатированными теплопереходами

Логарифмическая зависимость для свободного модуля дает возможность выявить, по крайней мере, три времени релаксации. Такой неполный набор объясняется наличием ультрабыстрых переходных процессов, которые трудно зарегистрировать на фоне более медленных.

Выводы

В целом можно заключить, что теоретические и экспериментальные результаты находятся в хорошем согласии. При этом, несмотря на приближенность метода аппроксимации единой экспонентой переходных процессов в многокаскадных модулях, такой способ оправдывает себя при оценке релаксационной постоянной в модуле с термостатированной горячей стороной. В связи с этим, хочется подчеркнуть особую важность применения экспериментального определения константы времени, например с помощью подобного модифицированного Z-метра, при измерении динамики ТЭО в корпусах.

-
1. Астахова Е.И., Бабин В.П., Равич Ю.И. Расчет и измерение постоянной времени охлаждающего термоэлемента в регулярном режиме. Инженерно-физический журнал, 62, 1992, 284.
 2. Кондратьев Г.М. Регулярный тепловой режим. Москва, ГИТТЛ, 1954, 408.
 3. Драбкин И.А. Переходные процессы в охлаждающих термоэлектрических модулях и устройствах. (Ibid)
 4. Harman T.C., Special techniques for measurement of thermoelectric properties. J.Appl. Phys., 29, 1959, 1373