

# МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВРЕМЕННОЙ ДИНАМИКИ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ОХЛАДИТЕЛЕЙ В Z-МЕТРИИ

Ершова Л.Б.<sup>1</sup>, Драбкин И.А.<sup>2</sup>, Володин В.В.<sup>1</sup>, Кондратьев Д.А.<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Институт Физики и Высоких Технологий, Москва,

<sup>2</sup>Институт Химических Проблем Микроэлектроники, Москва, Россия  
Fax: +7-095-132-5870

## 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:

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

где  $j$  – плотность тока, протекающего через ветвь,  $\alpha$  – коэффициент Зеебека,  $\kappa_0$  – 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:

$$I \ll I_{max}, \quad (16)$$

Время релаксации самого медленного процесса обозначим  $\tau_{max}$ , и оно определено в следующих случаях.

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, его теплопереходы, через которые осуществляется теплообмен с окружающей средой, свободны, тогда:

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

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

Выражение (3) есть максимальное время релаксации модуля, полученное в приближении  $j=0$ . При  $j \neq 0$  время релаксации находится путем численного решения соответствующего характеристического уравнения.

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:

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

$$\tau = \frac{\tau_{max1} \tau_{max2}}{(\tau_{max1} + \tau_{max2})} \quad (46)$$

Здесь  $\tau_{1max}$  и  $\tau_{2max}$  – 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):

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

$$\tau_{ij} = \frac{\tau_{max i} \tau_{max j}}{(\tau_{max i} + \tau_{max j})} \quad \forall i, j \quad (5б)$$

### 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 или в изделие.

При этом прибор выполняет двойную функцию. С одной стороны, он позволяет измерять термоэлектрическую добротность Z ТЭО по методу Хармана, а с другой, отслеживает кинетику выхода в стационарное состояние, т.к. именно к нему применим метод Хармана. Таким образом, один и тот же прибор является как Z – метром, так и  $\tau$  - метром. Соответствующее программное обеспечение позволяет вывести данные о кинетике выхода ТЭО в стационарный режим путем измерения во времени напряжения термоэдс  $U_\alpha(t)$  и интерполировать эти данные экспонентой:

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

где  $Ust_\alpha$  - стационарное напряжение термоэдс, а  $\tau$  - время релаксации.

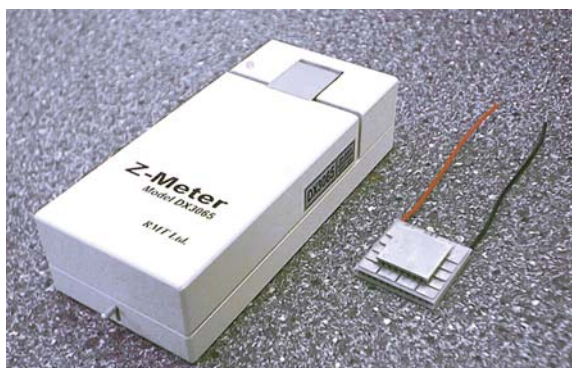


Рис. 1. Внешний вид Z-метра.

Для проверки правильности аппроксимации кинетических процессов в модуле одним показателем экспоненты имеется возможность

дополнительно исследовать ход кинетики в полу логарифмическом масштабе, т.е. функцию

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

### 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,  $\tau_{exp}$ ,  $\tau_{theory}$  – экспериментально и теоретически полученные времена релаксации, D – безразмерное среднее квадратическое 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/см<sup>3</sup>, для керамики – 0,8 Дж/г и 3,5 г/см<sup>3</sup>, для припоя – 0,17 Дж/г и 9,3 г/см<sup>3</sup>, толщина керамики 0.5мм.

Таблица 1.  
Параметры измеренных ТЭО

Тип ТЭО	Размеры теплопереходов, мм <sup>2</sup>		S <sub>0,2</sub> , мм <sup>2</sup>	L, мм	N	I <sub>max</sub> , 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 (1б).

Таблица 2.  
Измеренные и расчетные константы времени однокаскадных ТЭО со свободными теплопереходами

Тип ТЭО	I, mA	$\tau_{\text{theory}}$ , c	$\tau_{\text{exp}}$ , c	D
1MT03-004-13	5	1.92	2.43	0.0018
	25	2.87	2.55	0.0007
1MC04-032-15*	5	2.56	3.20	0.0003
	25	3.53	3.14	0.0001
1MC06-030-05*	5	0.82	0.75	0.0012
	25	0.82	0.71	0.0003
1MC06-060-05	5	0.80	0.68	0.0009
	25	0.80	0.65	0.0002
1MC06-018-15*	5	2.56	2.23	0.0007
	25	2.57	2.26	0.0002
1MC06-024-15	5	2.56	2.44	0.0005
	25	2.95	2.47	0.0002
1MT04-059-16	5	2.91	2.47	0.0002
	25	2.91	2.50	0.0001

Знаком «\*» в Таблице 2 отмечены 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, mA	$\tau_{\text{theory}}$ , c	$\tau_{\text{exp}}$ , c	D, mB
1MC04-032-15*	5	6.59	6.10	0.0057
	25	6.43	5.77	0.0098
1MC06-030-05*	5	1.65	1.28	0.0036
	25	1.64	1.45	0.0062
1MC06-018-15*	5	4.77	3.96	0.0049
	25	4.71	3.96	0.0071

Из приводимых данных (таблицы 3) видно, что при термостатируемом горячем теплопереходе всегда, а при свободных теплопереходах (таблица 2) в большинстве случаев, рассчитанное время релаксации оказывается на 10 – 20 % больше измеренного, что может быть связано с неточным учетом процессов теплообмена с окружающей средой, которые уменьшают время релаксации. Видно также, что времена релаксации для свободного модуля оказываются приблизительно в два раза

меньше, чем для модуля с термостабилизированным горячим теплопереходом.

Типичные телеметрические данные измерений приведены на рис.2.

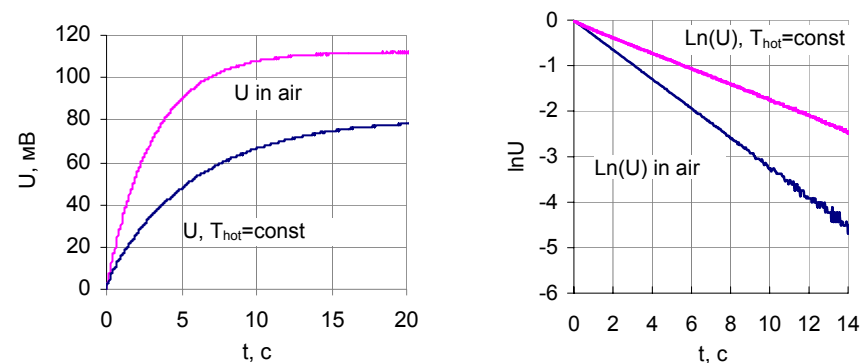


Рис. 2. Измеренные значения напряжения термоЭДС для ТЭО 1MC04-032-15 при 25mA

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 5 мА 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			$S_{O_2}$ , мм <sup>2</sup>	l, мм	N <sub>1</sub>	N <sub>2</sub>	I <sub>max</sub> , А
	Cold	Medium	Hot					
2MC06-10-10	3,2x3,2	4,0x4,0	4,0x4,0	0,36	1,05	6	14	1,3
2MC04-039-15	4,9x4,9	6,5x6,5	6,5x6,5	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	$\tau_1, c$	$\tau_2, c$	$\tau_1 + \tau_2, c$	$\tau_1 \tau_2 / (\tau_1 + \tau_2), c$
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 может выявлять быструю и медленную составляющую. Описывать этот случай с помощью одной экспоненты можно только в качестве оценки. Проанализируем, насколько она приемлема. В таблице 6 приведены экспериментальные результаты.

Таблица 6.  
Экспериментальные результаты для двухкаскадных ТЭО

Тип ТЭО	Свободные теплопереходы		Термостатированный теплопереход	
	$\tau_{exp}, c$	D	$\tau_{exp}, c$	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 динамики напряжения термоЭДС от времени для двух вариантов теплообмена горячей стороны.

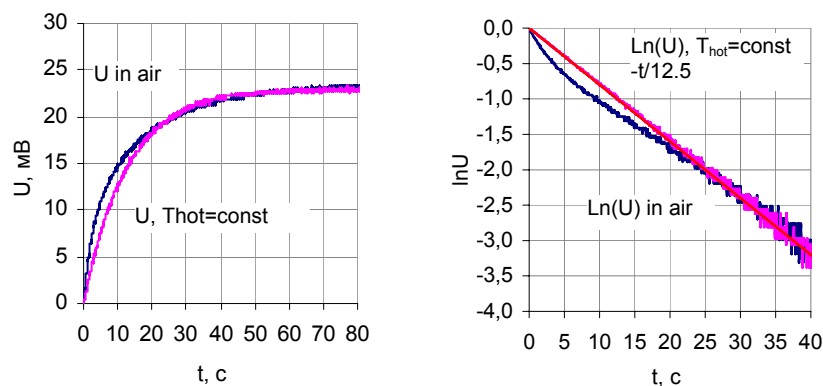


Рис. 3. Измеренные значения термо-ЭДС для ТЭО 2МС04-039-15 при 5мА

Видно, что для варианта термостатированного горячего теплоперехода логарифмическая зависимость имеет линейный характер.

На рисунке 4 приведена временная зависимость для ТЭО со свободными теплопереходами.

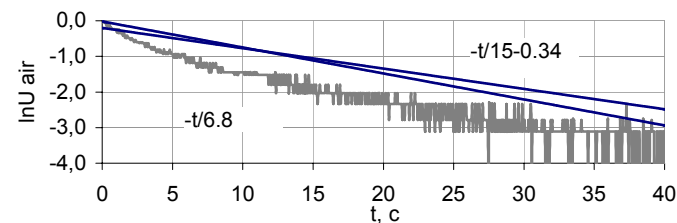


Рис. 4. Логарифмическая релаксационная кривая для ТЭО 2МС04-039-15 при 5мА со свободными теплопереходами.

Видно, что времена релаксации, определенные по зависимостям в полулогарифмическом масштабе:  $\tau = 15c$  и  $\tau = 6,8c$  близки к расчетным для случая таблицы 5.

Проведем аналогичный анализ случая трехкаскадного ТЭО. Параметры испытанных двухкаскадных ТЭО и результаты расчетов приведены в Таблицах 7 и 8.

Таблица 7.  
Параметры испытанных двухкаскадных ТЭО

Тип ТЭО	Размеры теплопереходов, мм <sup>2</sup>			$s_{0,2}, мм^2$	l, мм	$N_1$	$N_2$	$N_3$	$I_{max}, A$
	Cold	Medium	Hot						
3МС06-024-13	2.5x2.5	4,0x4,0, 6.1x6.1	6.1x6.1	0.36	1.3	6	14	32	1.05
3МС07-098-115	8x8	10x10, 12x12	12x12	0.49	1.15	36	42	132	1.45

Таблица 8.  
Расчетные данные для трехкаскадных ТЭО в случае термостатированного горячего теплоперехода

Тип ТЭО	$\tau_1, c$	$\tau_2, c$	$\tau_3, c$	$\tau_1 + \tau_2 + \tau_3, c$
3МС06-024-13	6.11	5.32	4.73	16.16
3МС07-098-115	9.54	5.32	3.08	17.94

В случае трехкаскадного модуля кроме медленной эволюции, описываемой суммарной константой времени могут иметь место еще три более быстрых переходных процесса в соответствии с (56). Усредненные экспериментальные данные, полученные регрессией одиночной экспоненты, даны в таблице 9.

Таблица 9.  
Экспериментальные результаты для трехкаскадных ТЭО

Тип ТЭО	Свободные теплопереходы		Термостатированный горячий теплопереход	
	$\tau_{\text{exp}}, \text{c}$	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 6).

Рассмотрим временные экспериментальные зависимости для ТЭО ЗМС06-024-13. На рис. 5 приведены зависимости динамики напряжения термоЭДС от времени для двух вариантов теплообмена.

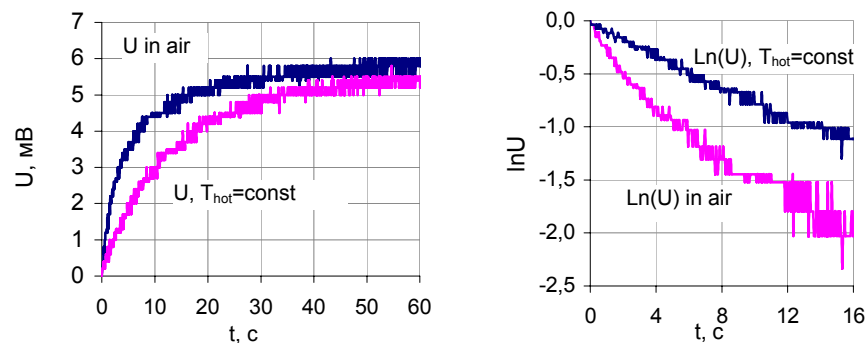


Рис. 5. Измеренные значения напряжения термоЭДС для ТЭО ЗМС06-024-13 при 5 мА

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

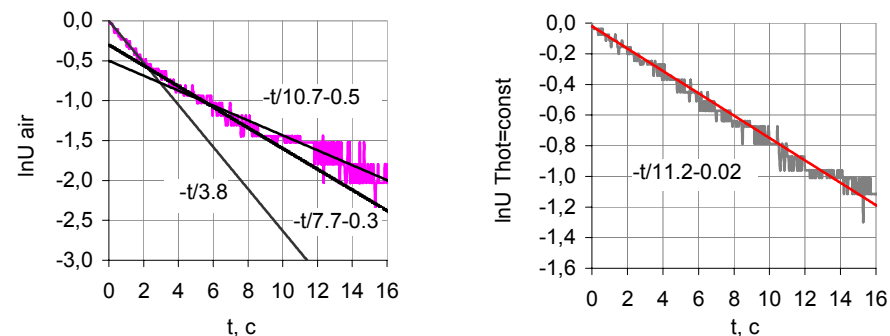


Рис. 6. Логарифмические релаксационные кривые для ТЭО ЗМС06-024-13 при 5 мА со свободными и термостатированным горячим теплопереходом.

Из рис. 5 видно, что при испытании модуля со свободными теплопереходами в кинетике присутствует быстрая составляющая, что отчетливо проявляется в виде излома на кривых, построенных в логарифмическом масштабе.

Для трехкаскадных модулей видно, по крайней мере, три прямолинейных участка, соответствующих различным временам релаксации. Сравнение расчетных и экспериментальных времен релаксации показывает, что последние оказываются приблизительно на 30 % меньше, что не удивительно, учитывая сходные расхождения для однокаскадных модулей.

### Выводы

С помощью Z-метра DX3065 можно исследовать кинетику процесса выхода термоэлектрических модулей в стационарное состояние как в условиях свободных теплопереходов (стандартная конфигурация Z-метра), так и в реальных рабочих условиях для модуля, смонтированного в корпусе, приборе, устройстве и т.п.

Сравнение экспериментальных результатов с расчетом показывает, что экспериментально определенные времена релаксации оказываются на 10 – 30 % меньше расчетных. В то же время теория правильно описывает основные характеристики процессов релаксации модулей в зависимости от реальных условий их эксплуатации.

Оценки времени релаксации, полученные на Z-метре, позволяют более точно описать нестационарные процессы в реальных термоэлектрических устройствах.

## Литература

---

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)