

Расширенные методы Z-метрии

В.Володин, Г.Громов, Л.Ершова, Д.Кондратьев, А. Огрызко, А. Рогов
РМТ Лтд. Россия 119991, Москва, Ленинский проспект 53.
тел: 095-132-6817 факс: 095-132-5870
e-mail: rmtcom@dol.ru <http://www.rmtltd.ru>

Аннотация

Представляется устройство DX3065 для измерения параметров термоэлектрических охладителей (ТЭО), а также сопутствующее программное обеспечение. Прибор дает возможность решить три проблемы, существующие в Z-метрии: необходимость малости величины электрического тока для каждого измеряемого ТЭО, достаточность времени эксперимента для выхода ТЭО в стационарный режим и учет неадиабатичности измерений с помощью поправок и биполярного усреднения. Прибор позволяет измерить сопротивление, константу времени и термоэлектрическую добротность ТЭО. Устройство DX3065 может использоваться как в качестве оперативного средства для экспресс-сертификации ТЭО и контроля качества ТЭО в массовом производстве.

Введение

Идея Z-метрии [1,2,3,4] подразумевает выполнение комплекса условий. К тепловым условиям относится незначительность Джоулевых потерь и взаимодействия с окружающей средой. Временное условие – измерение ТЭО в стационарном режиме, ибо математическая база метода есть балансные стационарные уравнения [2]. В приборе DX3065 реализуются все три условия благодаря возможности сканирования по току, расчетным поправкам и считыванию телеметрических данных во времени.

Прибор DX3065 позволяет получить:

- Сопротивление на переменном токе (R)
- Временную константу ТЭО, характеризующую выход на режим при данных условиях измерения
- Термоэлектрическую добротность (Z)

Прибор позволяет испытывать различные типы однокаскадных ТЭО.

Кроме того, с помощью устройства DX3065 возможно оценить значение Z двухкаскадного ТЭО, а также временную константу и сопротивление многокаскадных модулей.

Работа построена следующим образом.

В Разделе 1 обсуждается метод, задействованный в приборе DX3065 при измерении термоэлектрической добротности Z . Приведено математическое обоснование по усреднению результата измерений для различных полярностей тока [4], что иллюстрируется экспериментальными данными. Экспериментально оценивается корректность вводимых поправок.

В разделе 2 описывается применение DX3065 для измерения константы времени ТЭО. Обсуждаются экспериментальные результаты.

Раздел 3 охватывает существенные технические аспекты измерения сопротивления модуля и напряжения термо-ЭДС. Показан внешний вид прибора и программной оболочки.

Завершает работу заключение.

1. Измерение термоэлектрической добротности:

биполярное усреднение и сканирование по току

При измерении термоэлектрической добротности Z ТЭО, модуль исследуется в незамкнутой системе. Имеет место теплообмен с окружающей средой, тепло Джоуля не равно нулю. Следовательно, необходимо учесть некоторые поправки [3] для того, чтобы применить выражения Хармана [2] для получения числа Z $Z = \alpha^2 / kR = \alpha^2 / \kappa \rho$ [5] (α - коэффициент Зеебека; k и ρ - теплопроводимость и электрическое удельное сопротивление модуля соответственно) и максимально достижимую ТЭО разность температур ΔT_{max} .

В работе предлагается единая теоретико-экспериментальная основа для выполнения условий измерения числа Z ТЭО в рамках метода Хармана.

Обычно уравнения теплового баланса в однокаскадном случае записываются следующим образом:

$$\begin{cases} \alpha T_0 - \frac{I}{2} I^2 R - k' \Delta T = a_1 (T_a - T_0) / N, \\ \alpha T_1 + \frac{I}{2} I^2 R - k' \Delta T = a_2 (T_1 - T_a) / N \end{cases}, \quad (1.1)$$

где N число ветвей модуля, a_1, a_2 – коэффициенты теплоотдачи с холодной и горячей сторон ТЭО ($a_1 \neq a_2$), k' эффективная теплопроводность ветви с учетом газовой среды (воздуха) и теплового излучения между ветвями.

Коэффициент k' описывается так:

$$k' = k(1 + b_{th}), \quad (1.2)$$

где

$$b_{th} = B_{cond} + B_{rad}, \quad (1.3)$$

Величины B_{cond} и B_{rad} – поправки, учитывающие дополнительную теплопроводность по воздуху и излучение между ветвями, соответственно:

$$B_{cond} = \frac{\kappa_{air}}{\kappa} \left(\frac{I}{\beta} - 1 \right), \quad (1.4)$$

Здесь коэффициент заполнения ветвями есть:

$$\beta = \frac{Ns}{S}, \quad (1.5)$$

где S – площадь холодной стороны ТЭО;

$$B_{rad} = \gamma \frac{S}{Nk} \sigma T_a^3 (1 - \beta), \quad (1.6)$$

где σ – константа Больцмана, γ – испускательная способность материала керамической подложки. Выражение (1.6) может рассматриваться, как некая приближенная оценка. Конвекционный вклад в теплопроводность между ветвями отсутствует, как следует из критериев Грасгофа и Прандтля для характерных размеров зазоров между ветвями [6].

В работе [8] уравнения (1.1) решались в рамках следующих приближений:

$$\frac{a_1}{N} \ll k', \quad \frac{a_2}{N} \ll k' \quad \text{и} \quad I \ll \frac{k'}{\alpha}, \quad (1.7)$$

И было найдено следующее [7,8]:

$$\bar{T} = T_a \left(I + \frac{a_1 a_2}{N(a_1 + a_2)k'} \right) + \frac{I^2 RN}{a_1 + a_2} \left(I + \frac{a_1 + a_2}{4nk'} \right) + T_a \frac{\alpha I (a_2 - a_1)}{2k'(a_1 + a_2)}, \quad (1.8)$$

$$\Delta T = \frac{\alpha I}{k'} \left(T_a + \frac{I^2 RN}{a_1 + a_2} \right) + \frac{a_1 - a_2}{k'(a_1 + a_2)} \frac{I^2 R}{2} \quad (1.9)$$

Требованиям (1.7) должно быть уделено серьезное внимание. Они описывают ограничение на взаимодействие измеряемого модуля с окружающей средой и на величину электрического тока, при котором проводятся измерения. Требование малости (1.7) означает, что количество тепла Пельтье, должно быть малым по сравнению с теплоотдачей в среду. Кроме того, мы видим, что (1.9) содержит величину $\frac{I^2 RN}{a_1 + a_2}$ - характеристику теплоты Джоуля.

Существенно, что ограничение для тока по теплоте Джоуля

$$I \ll \sqrt{\frac{(a_1 + a_2)T_a}{NR}} \sim \sqrt{(a_1 + a_2)T_a \frac{I_{max}}{U_{max}}} \quad (1.10)$$

Играет более важную роль, чем в неравенстве для тока (1.7). Это проиллюстрировано на рис. (1.1а) и (1.1б).



Рис.1.1а. Сравнительная диаграмма требований Пельтье и Джоуля, накладываемых на значения измерительного электрического тока для ТЭО, отличающихся высотой ветвей. Испытываемые ТЭО - 1МС04-004-(05 – 15).

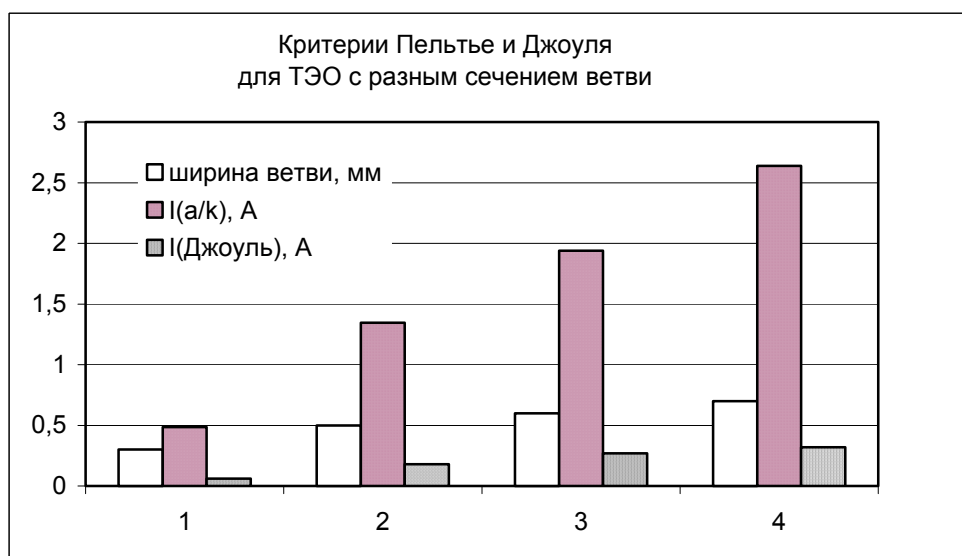


Рис.1.1б. Сравнительная диаграмма требований Пельтье и Джоуля, накладываемых на значения измерительного электрического тока для ТЭО, отличающихся сечением ветвей. Испытываемые ТЭО - 1МТ(03 – 07)-008-13.

Как видно из рис. (1.1а,б) требованием малости тока должен служить критерий Джоуля (1.10).

Аппаратная нижняя граница измерений не учитывается ни одним из вышеприведенных математических рассуждений и будет рассмотрена далее.

С учетом (1.9) мы получаем следующие выражения для термо-ЭДС и отношения величин напряжений:

$$U_{\alpha} = \frac{\alpha^2 IN}{k'} \left(T_a + \frac{I^2 RN}{a_1 + a_2} \right) + \frac{(a_1 - a_2) I^2 RN \alpha}{2k'(a_1 + a_2)} \quad (1.11)$$

$$\frac{U_{\alpha}}{U_R} = \frac{\alpha^2}{k'R} \left(T_a + \frac{I^2 RN}{a_1 + a_2} \right) + \frac{(a_1 - a_2) I \alpha}{2k'(a_1 + a_2)}, \quad (1.12)$$

или

$$\frac{U_{\alpha}}{U_R} = Z' \left(T_a + \frac{I^2 RN}{a_1 + a_2} \right) + \frac{(a_1 - a_2) I \alpha}{2k'(a_1 + a_2)}, \quad (1.13)$$

где $Z' = \frac{\alpha^2}{k'R}$.

Таким образом, $Z (= \alpha^2/kR)$ может быть найдена как

$$Z = \frac{1}{T_a(1+b_T)} \left\{ \frac{U_{\alpha}}{U_R} (1+b_{th})(1+b_r) + b_A \right\}, \quad (1.14)$$

где

1) $b_T = \frac{1}{T_a} \frac{I^2 RN}{a_1 + a_2}$ - поправка к температуре окружающей среды

2) $b_A = \frac{(a_2 - a_1) I \alpha}{(a_2 + a_1) 2k}$ - поправка, учитывающая асимметрию холодная-горячая сторона модуля;

3) $b_{th} = B_{cond} + B_{rad}$ - поправка, учитывающая дополнительную теплопроводность по воздуху и излучение между ветвями (в соответствии с (1.4)-(1.6));

4) $b_r = \frac{r}{NR}$ - поправка на сопротивление r подводющих проводов

Благодаря поправкам, приведенным выше, выражение (1.14) дает возможность учесть влияние воздействия измерений в DX3065.

Сравнительный анализ вклада поправок в результирующее значение Z был ранее осуществлен в работах [4,8]. В работе [8] были также рассмотрены две проблемы: измерение Z для системы ТЭО+радиатор и двухкаскадных ТЭО.

Безусловно, допущения, сделанные в теории, накладывают многие ограничения на применения метода измерения Z в смонтированных сборках ТЭО. Однако можно выделить два возможных выхода:

1. Учет нежелательных эффектов с помощью поправок (1.14). Нужно, однако иметь в виду, что всем поправкам присуща некая доля неопределенности, так как известны лишь приближенные значения величин, входящих в расчет.

2. В работе [4] было рекомендовано так называемое биполярное усреднение. Покажем, что этот метод позволяет исключить поправку b_A (1.14). Рассмотрим выражения (1.12) - (1.14).

Как видим, b_A представляет собой линейную функцию тока. Обозначая полярности (+) и (-), имеем:

$$\left(\frac{U_\alpha}{U_R}\right)_+ = \frac{\alpha^2}{k'R} \left(T_a + \frac{I^2 RN}{a_1 + a_2}\right) + \frac{(a_1 - a_2)I\alpha}{2k'(a_1 + a_2)} \quad (1.15a)$$

$$\left(\frac{U_\alpha}{U_R}\right)_- = \frac{\alpha^2}{k'R} \left(T_a + \frac{I^2 RN}{a_1 + a_2}\right) + \frac{(a_2 - a_1)I\alpha}{2k'(a_1 + a_2)} \quad (1.15b)$$

Суммируя выражения (1.15a) и (1.15b), получаем:

$$\left(\frac{U_\alpha}{U_R}\right)_+ + \left(\frac{U_\alpha}{U_R}\right)_- = 2Z' \left(T_a + \frac{I^2 RN}{a_1 + a_2}\right) \quad (1.16)$$

Таким образом, величина Z может быть найдена как:

$$Z = \frac{I}{T_a (I + b_T)} \left\{ \left[\frac{U_\alpha}{U_R} \right]_{averaged} (I + b_{th})(I + b_r) \right\} \quad (1.17)$$

На рис. 1.2а,б можно видеть результаты биполярного тестирования и усреднения

$(Z_{av} = \frac{I}{T_a} \left[\frac{U_\alpha}{U_R} \right]_{averaged})$ в зависимости от тока с учетом и без учета поправок (1.14).

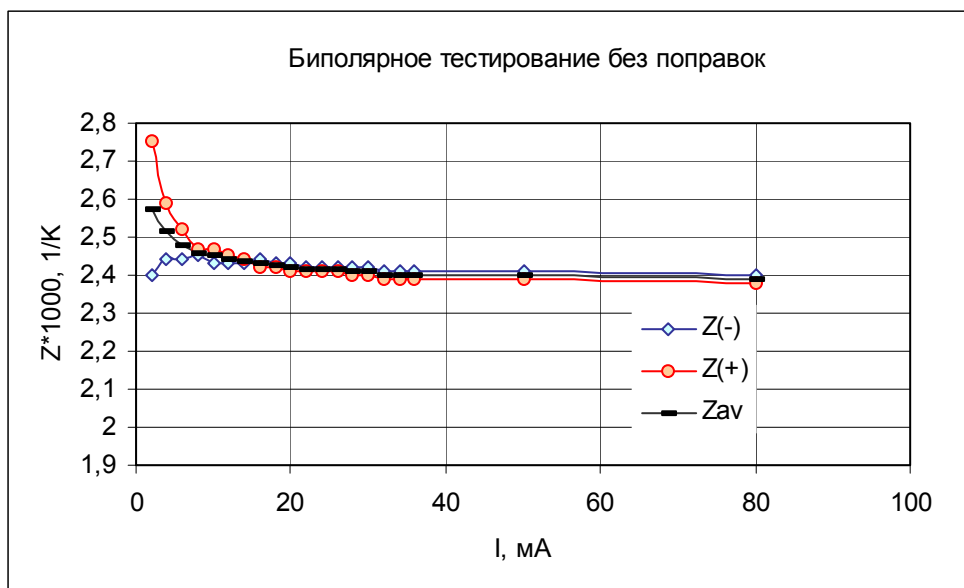


Рис.1.2а.Результирующая термоэлектрическая добротность при сканировании по току без поправок для однокаскадного ТЭО (1МС06-032-15).

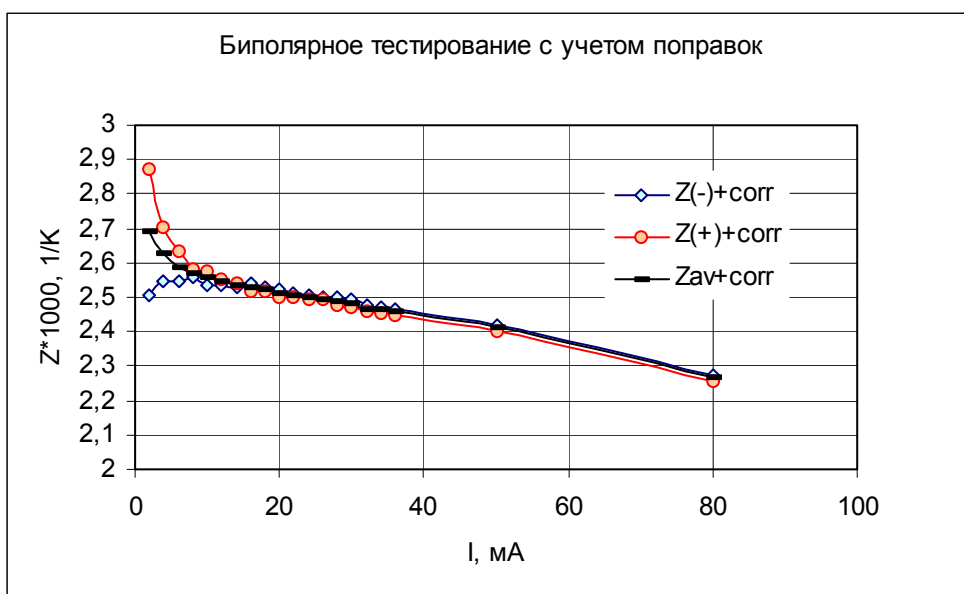


Рис.1.2б. Результирующая термоэлектрическая добротность при сканировании по току с учетом поправок (1МС06-032-15).

Вооруженные возможностью сканировать ток, мы можем оценить правильность поправки на асимметрию с помощью следующей формулы:

$$\left(\frac{U_{\alpha}}{U_R}\right)_{+} - \left(\frac{U_{\alpha}}{U_R}\right)_{-} = \frac{(a_2 - a_1)I\alpha}{k'(a_1 + a_2)} \quad (1.18)$$

На рис. 1.3 сопоставлены поправка на асимметрию, полученная из измеренных отношений напряжений (левая часть (1.18)) и теоретическое выражение для данной поправки (правая часть (1.18)).

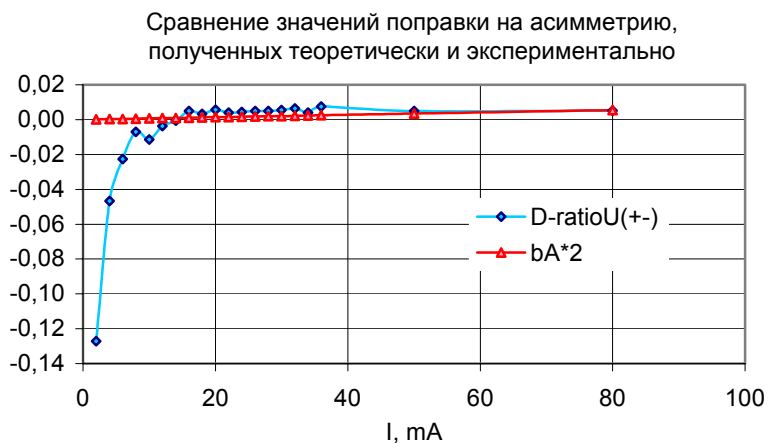


Рис. 1.3. Пример сравнения теоретически и экспериментально полученной зависимости поправки на асимметрию от тока (ТЭО 1МС06-032-15). Конвекционный коэффициент теплоотдачи $4 \text{Вт/м}^2\text{К}$, площади холодной и горячей сторон 64мм^2 и 80мм^2 соответственно, удельная теплопроводность материала ветвей 1.35Вт/мК .

Видно, что расчетная поправка на асимметрию не оправдывает себя при малых токах (примерно меньше 10мА). Исключение этой поправки с помощью биполярного усреднения, действительно, разумно.

По-видимому, отклонение на малых токах может быть объяснено чисто аппаратными явлениями. К этому выводу позволяет прийти тот факт, что для разнообразия тестируемых однокаскадных ТЭО рассматриваемое отклонение затухает на токах выше 10мА . Как следствие мы предлагаем выбирать токи для измерения величины Z не ниже 5мА .

Можно показать, что вышеизложенная теория справедлива для системы ТЭО+радиатор в случае $a_0 / a_{heat\ sink} \ll I$, что, фактически, всегда имеет место.

Простейшая система уравнения для двухкаскадного ТЭО [8]:

$$\begin{cases} \alpha IT_0 - \frac{l}{2} I^2 R - k'_1 (T_1 - T_0) = \frac{a_1}{N_1} (T_a - T_0) \\ \alpha IT_2 + \frac{l}{2} I^2 R - k'_2 (T_2 - T_1) = \frac{a_2}{N_2} (T_2 - T_a) \end{cases}, \quad (1.19)$$

где T_0 , T_1 и T_2 - температуры, соответственно, холодной, промежуточной и горячей подложки, a_1 и a_2 полные коэффициенты теплоотдачи в среду с холодной и горячей сторон.

Измерение Z для двухкаскадного ТЭО допускается лишь при выполнении требований [8]:

$$\frac{a_1}{N_1} = \frac{a_2}{N_2} = A = const, \quad \beta_i = \frac{N_i S}{S_i} = const, \quad k'_1 = k'_2 = k' \quad (1.20)$$

Поэтому биполярное тестирование также имеет смысл для двухкаскадного ТЭО с точки зрения уточнения полученных данных.

К сожалению, математическая обработка двухкаскадного случая, подобная выше приведенной для однокаскадного случая (см. уравнения (1.1) – (1.14)), дающая непосредственную корреляцию между средней температурой модуля и температурой окружающей среды не столь проста и до сих пор кажется невозможной. В двухкаскадном случае с учетом (1.20) мы получаем [8]:

$$Z\bar{T} = (1 + b_{th})(1 + b_r) \frac{U_\alpha}{U_R}. \quad (1.21)$$

Здесь $\bar{T} = \frac{T_2 + T_0}{2}$ есть средняя температура, которую полагают равной температуре окружающей среды. Поправка b_r удовлетворяет (1.14).

$$b_{th} = B_{cond} + A_{conv} + (B_{rad} + A_{rad}) \quad (1.22)$$

Параметры B_{cond} , B_{conv} , B_{rad} описаны в (1.4-1.6). Конвекция и излучение с внешних поверхностей есть [8]:

$$A_{conv} = \frac{al}{\kappa\beta} \quad (1.23a)$$

$$A_{rad} = \frac{\gamma}{\kappa\beta} \sigma T_a^3 l \quad (1.236)$$

На рис. 1.4а,б можно видеть результаты биполярного тестирования и усреднения

$(Z_{av} = \frac{I}{T_a} \left[\frac{U_\alpha}{U_R} \right]_{averaged})$ для двухкаскадного ТЭО в зависимости от тока с учетом и без учета

поправок (1.21) – (1.23).

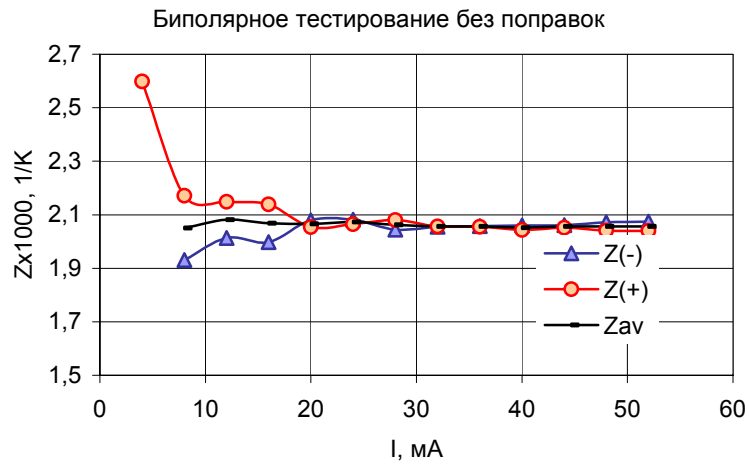


Рис.1.4а. Результирующая термоэлектрическая добротность при сканировании по току без поправок для двухкаскадного ТЭО (2МС06-010-10).

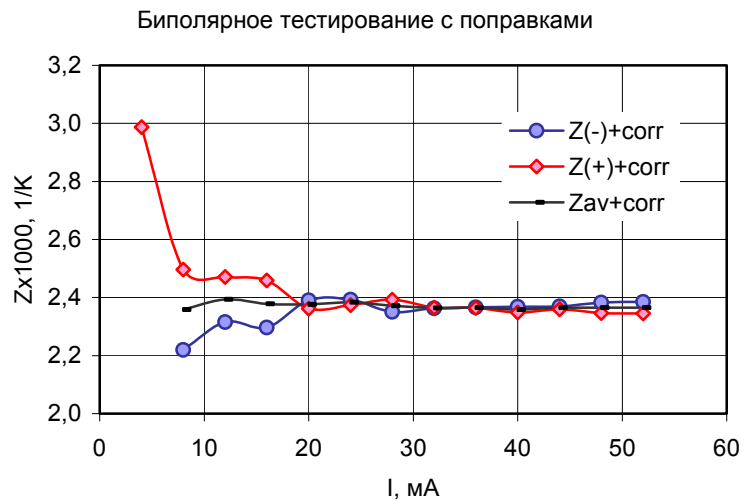


Рис.1.4б. Результирующая термоэлектрическая добротность при сканировании по току с поправками (1.21) для двухкаскадного ТЭО (2МС06-010-10).

Как же ответить на вопрос: какой должен быть ток измерений при определении величины Z?

Для измерения однокаскадных и двухкаскадных ТЭО ответ таков. Следует взять значение

усредненной Z , соответствующее токам, при которых измерения на той и другой полярности не испытывают нефизического возрастания.

Для однокаскадного случая 1МС06-032-15, рассмотренного выше, мы исключаем нефизические значения Z при значениях тока менее 5мА и получаем искомое значение Z .

Для ТЭО 1МС06-032-15 (см. рис. 1.2б) $Z=2.6 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$.

Для приводившегося примера двухкаскадного ТЭО аналогичная процедура позволяет найти $Z=2.4 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$ (см. рис.1.4б).

2. Измерение константы времени

Как показано в разделе 1, вся математика измерений Z основана на балансных уравнениях, что справедливо лишь для времен, много больших чем характеристическое время системы. С учетом этого должны выбираться временные ограничения прибора.

Нестационарное охлаждение для единичной ветви и однокаскадного ТЭО изучалось в ряде работ [9,10]. Было показано [11], что решение соответствующих дифференциальных уравнений может быть записано в виде суперпозиции бесконечного числа экспонент:

$$\Delta T(t, x) = \sum_{i=1}^{\infty} (A_n U_n(x)) e^{-m_n t} + \Delta T_{st}(x) \quad (2.1)$$

Здесь $\Delta T(t, x) = T - T_a$, T - температура точки ветви ТЭО с обобщенной координатой x в момент времени t , U_n и m_n – собственные функции и собственные значения, A_n – тепловые амплитуды, $\Delta T_{st}(x)$ – решение в стационарном случае.

Анализ решения (2.1) показывает, что процесс охлаждения можно условно разделить на два этапа: нерегулярный и регулярный [11]. Первый этап детерминирован начальными условиями и описывается суммой множества экспонент. Эта фаза довольно быстро затухает, в случае если теплопроводность ветвей ТЭО достаточно велика. По прошествии первого этапа динамика описывается одной экспонентой (регулярный режим). Это явление и нашло свое применение в DX3065.

С учетом вышесказанного для оценок имеет смысл пользоваться следующим качественным соотношением для временной константы ветви $\tau = 1/m_{\min}$ [3,12]:

$$\tau_0 \sim \frac{l^2 dc}{\kappa}, \quad (2.2)$$

где l , d , κ , c высота ветви, плотность, теплопроводимость и удельная теплоемкость материала ветви соответственно.

Из качественных соображений для однокаскадного ТЭО с учетом теплоемкости C объекта на холодной стороне можно записать:

$$\tau \sim \frac{lC}{\kappa s N}, \quad (2.3)$$

Выражение (2.3) есть не что иное, как отношение теплоемкости охлаждаемого объекта к полной теплопроводности всех ветвей.

В работах [10,12] было также показано, что характеристическое время обнаруживает зависимость от электрического тока. DX3065 дает возможность проверить это.

Процедура обработки временных данных в приборе такова.

Процесс выхода в стационарный режим однокаскадного ТЭО регистрируем посредством измерения термо-ЭДС U_α :

$$U_\alpha = \alpha \Delta T \quad (2.4)$$

Измерения проводятся для обеих полярностей. Время сбора данных и временной шаг можно варьировать. Полученные экспериментальные данные затем интерполируются с помощью функции:

$$U_\alpha(t) = Ust_\alpha(1 - e^{-t/\tau}) \quad (2.5)$$

Экспоненциальная регрессия основана на методе наименьших квадратов. Результат обработки - получение значения временной константы τ и стационарного напряжения термо-ЭДС Ust_α , необходимого в измерениях по методу Хармана.

На рис. 2.1 представлены динамические кривые для однокаскадного ТЭО 1МС06-032-15 при различных значениях тока.

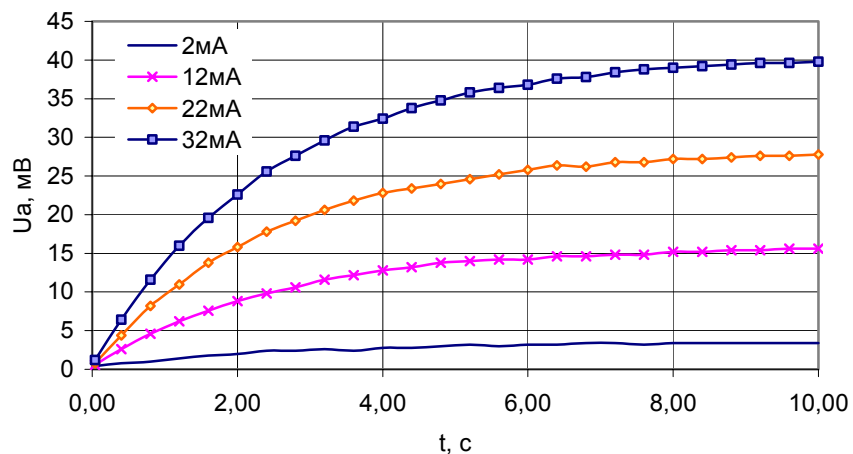


Рис.2.1. Выход в стационарное состояние для однокаскадного ТЭО в зависимости от значения тока (1МС06-032-15).

На рис. 2.2 мы видим зависимость констант времени от тока для того же ТЭО (рис. 2.1) и для ТЭО с в три раза меньшей высотой ветви.

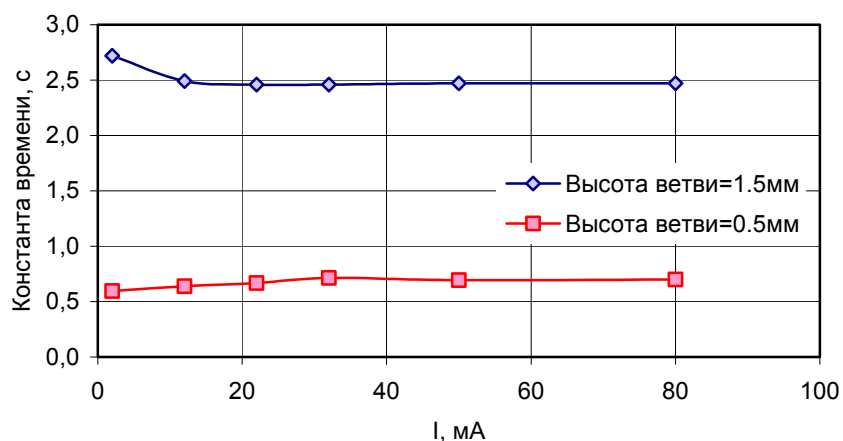


Рис.2.2. Значения констант времени двух однокаскадных ТЭО, полученная при разных токах (1МС06-032-15 и 1МС06-032-05).

На следующем рисунке представлено нестационарное поведение двух ТЭО отличающихся числом ветвей для одного и того же значения тока (10мА). Отличие временных констант, по-видимому, связано с небольшим варьированием отношения (2.2).

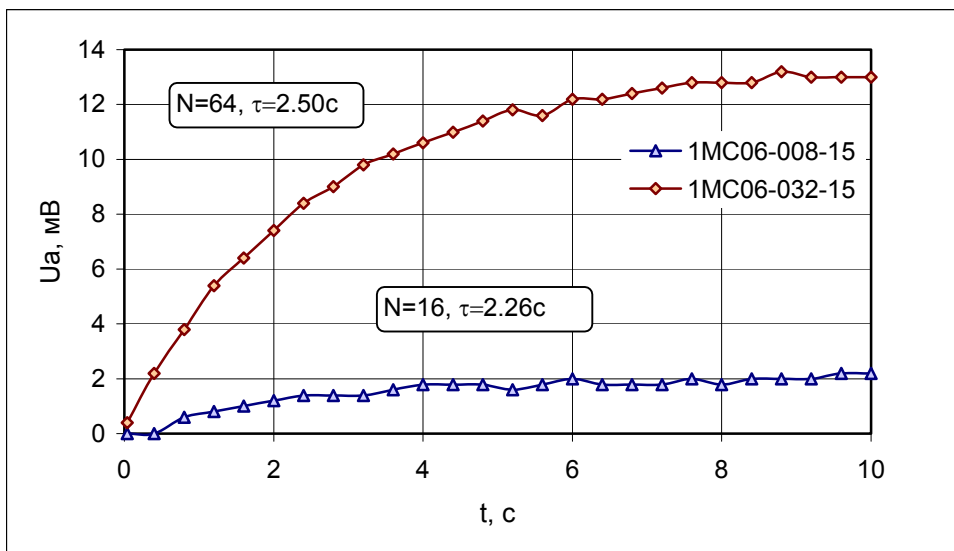


Рис.2.3. Временное поведение двух однокаскадных ТЭО с различным числом ветвей (1MC06-032-15 и 1MC06-008-15).

Для многокаскадных модулей отношение (2.4) не применимо. Однако константа времени может быть оценена по (2.4), и способ получения стационарного напряжения Зеебека тот же, что и для однокаскадного модуля. На рис. 2.4 показан пример временного поведения двухкаскадного ТЭО.

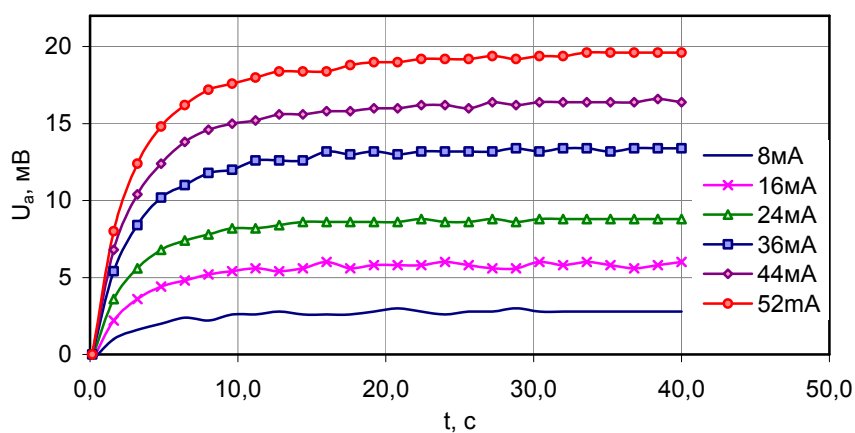


Рис.2.4. Выход на режим двухкаскадного ТЭО (2MC06-010-10) при разных значениях тока.

3. Технические аспекты

Внешний вид DX3065 представлен на рис. 3.1.

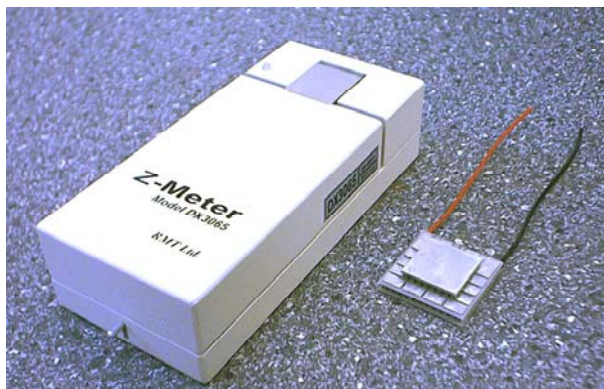


Fig.3.1. Внешний вид DX3065.

Корпус DX3065 выполнен из алюминиевого сплава. При измерении ТЭО он выполняет функцию пассивного термостата. Температура корпуса измеряется с помощью цифрового термометра с точностью не хуже 0.1° .

Измеряемый ТЭО помещается в этот корпус.

Подсоединение модуля происходит через специальные разъемы.

Упрощенная функциональная схема DX3065 показана на рис. 3.2.

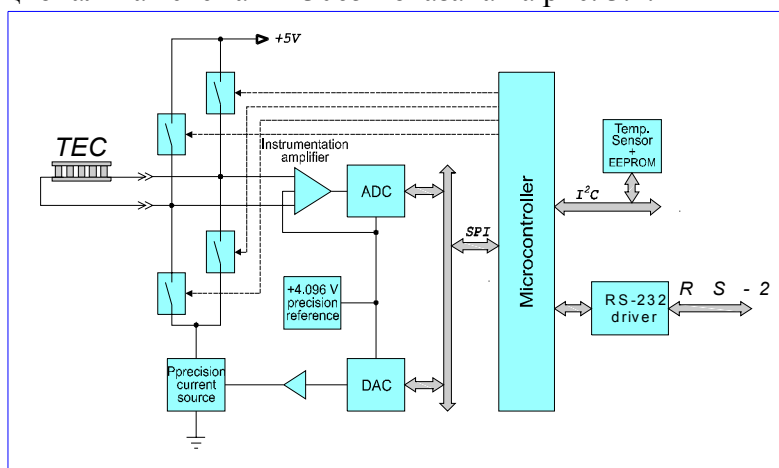


Рис.3.2. Функциональная схема DX3065

Рассмотрим основы измерений двух ключевых параметров (ACR и U_α).

3.1 Измерение сопротивления на переменном токе (ACR)

На ТЭО подается переменный ток малой амплитуды.

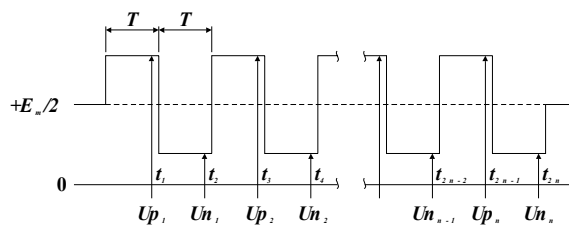


Рис. 3.3 Временная диаграмма напряжений

В отсутствии сигнала выходное напряжение усилителя равно $E_m/2$ (рис. 3.3). Во время измерения сопротивления выходное напряжение измеряется с помощью 12-битового ADC прежде, чем ток I_m реверсируется. Точки измерения помечены на рисунке t_i . Падения напряжения U_{p_i} и U_{n_i} соответствуют положительной и отрицательной полярности. Сопротивление рассчитывается по следующей формуле

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (U_{p_i} - U_{n_i})}{2 \cdot I_m \cdot A_V \cdot n} \quad (3.1)$$

Здесь A_V – коэффициент усиления усилителя; n – полное число выборок за измерение.

3.2 Измерение термо-ЭДС

При измерении полного напряжения и напряжения U_α на модуль периодически подается малый ток (скважность равна двум).

Необходимо два последовательных сеанса измерений для получения полного напряжения и термо-ЭДС при токе той и другой полярности.

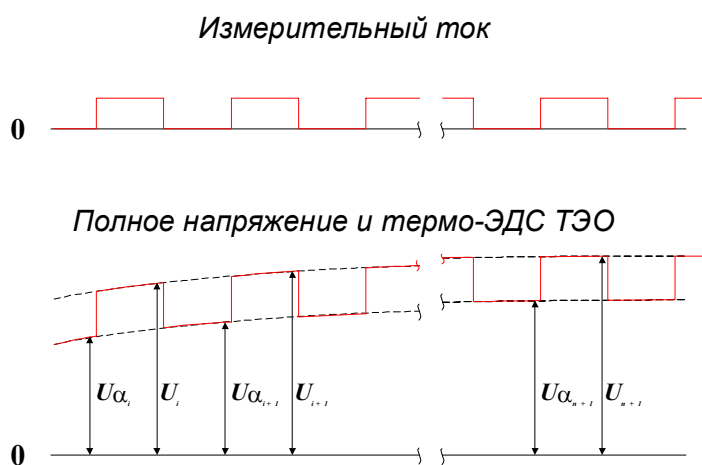


Рис. 3.4 Временная диаграмма измерения напряжений

3.3 Программное обеспечение

Основное окно программы DX3065 дано на рис. 3.5.

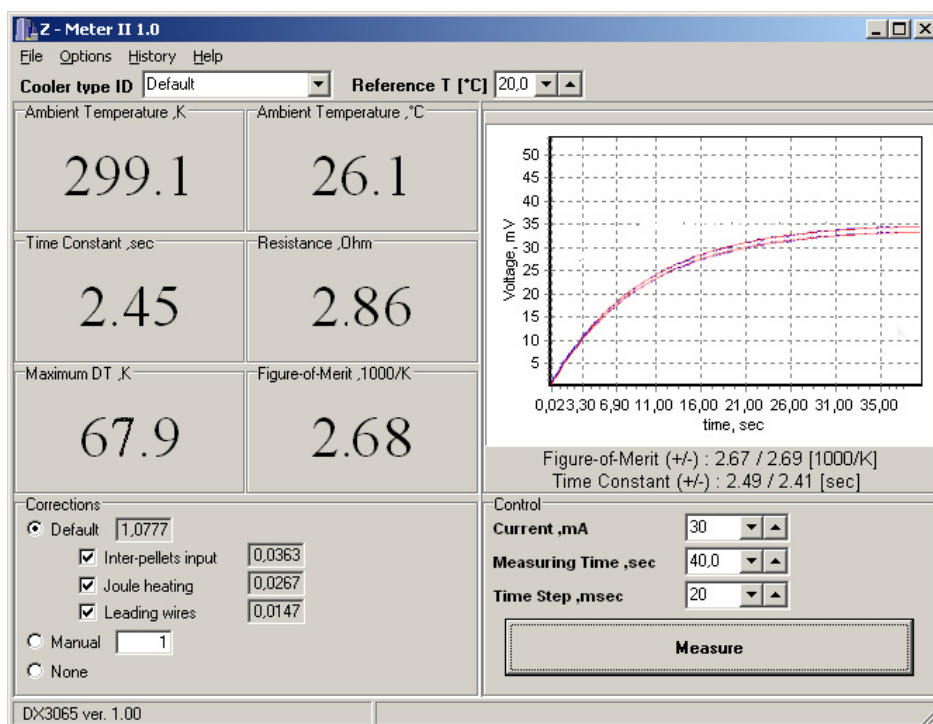


Рис.3.5. Основное окно программы DX3065

4. Заключение

Представлена усовершенствованная версия Z-метра, позволяющая измерять термоэлектрическую добротность ТЭО, константу времени, характеризующую выход на стационарный режим, и сопротивление на переменном токе, что играет существенную роль при сертификации, контроле качества, обнаружении неисправностей модулей и может быть использовано как производителями, так и потребителями ТЭО.

Литература

1. Putley E.H. Thermoelectric and Galvanometric effects in lead selenide and telluride. Proc. Phys. Soc. B., 68, 1955, 35.
2. Harman T.C., Special techniques for measurement of thermoelectric properties. J.Appl. Phys., 29, 1959, 1373.
3. Babin V.P., Gorodetskiy S.M. Thermoelectric modules quality testing by a manufacturer. Proc. IV Int. Conf. on Thermoelectrics, 1995, 338.
4. Buist R.J. Methodology for Testing Thermoelectric Materials and Devices. CRC Handbook of Thermoelectrics. CRC Press LLC, 1995, 701.
5. Лукишкер Э.М, Вайнер А.Л., Сомкин М.Н., Водолагин В.Ю. Термоэлектрические охладители. Москва, “Радио и связь”, 1983, 175.
6. Дульнев G.N. Теплообмен в радиоэлектронных приборах. Ленинград, Госэнергоиздат, 1963, 288.
7. И.А.Драбкин. Характеристики термоэлектрических модулей. Санкт-Петербург, 2002, 146.
8. Gromov G., Kondratiev D., Rogov A., Yershova L. Z-meter: Easy-to-use Application and Theory. Proc. Of VI Eur. Workshop on Thermoelectrics, Freiburg, 2001.
9. Gray P.E. The Dynamical Behaviour of Thermoelectric Devices. N.Y., London, 1960.
10. 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.
11. Кондратьев Г.М. Регулярный тепловой режим. Москва, ГИТТЛ, 1954, 408.
12. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства. Киев, Наукова думка, 1979, 766.