

недостаточной надежностью, непредсказуемыми задержками между устройствами полевого уровня и обслуживающими их серверами.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. SCADA // Свободная энциклопедия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/SCADA> (дата обращения 08.12.2019).
2. Системы автоматического контроля // Сбор информации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://bourabai.ru/dbt/scada.htm> (дата обращения 16.12.2019).
3. Industrial Internet of Things – IIoT // Промышленный интернет вещей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:IIoT> (дата обращения 20.12.2019).
4. Системы промышленной автоматизации // SCADA системы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.adastra.ru/> (дата обращения 26.12.2019).
5. Автоматизированные системы управления // АСУ ТП [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://wiki.mvtom.ru/index.php> (дата обращения 25.12.2019).
6. Развитие автоматизированных систем [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/razvitie-avtomatizirovannyh-sistem-upravleniya-tehnologicheskimi-protsessami> (дата обращения 26.12.2019).

#### **АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДАТЧИКА ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДЕФЕКТОСКОПА**

А.А. Абуллаель, Д.А. Солдатов, А.А. Солдатов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050  
E-mail: demo\_092@icloud.com

#### **ANALYSIS OF THE ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF THE THERMOELECTRIC FLAW DETECTOR SENSOR**

A. A. Abuleil, D.A. Soldatov, A.A. Soldatov

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050  
E-mail: demo\_092@icloud.com

***Annotation.** The article presents a method for calculating the equivalent source of thermal EMF for thermoelectric nondestructive testing devices. The calculation is based on the use of the source superposition method, which makes it possible to obtain the calculated ratios in an optimal way.*

Наиболее перспективным методом неразрушающего экспресс-контроля металлов и сплавов считается термоэлектрический, который позволяет проводить контроль как в процессе производства так и в процессе эксплуатации. Однако, серийно выпускаемые в настоящее время термоэлектрические дефектоскопы не обладают высокой надежностью и воспроизводимостью результатов контроля [1]. Это обусловлено наличием переходного сопротивления при контакте электрода с образцом, изменением температуры горячего электрода в процессе контроля, зависимостью термоЭДС от разности температур между горячим и холодным электродом, площади контакта горячего электрода с образцами и т. д. [2, 3]. Кроме того, анализ литературы показал, что до сих пор не проводилось исследований электрических характеристик источников термоЭДС.

Для решения этих проблем необходимо использовать электроды особой конструкции, которая обеспечивает получение эквивалентной характеристики термоЭДС от поверхности контролируемого изделия. При такой конструкции

электрода эквивалентная схема электродной части будет содержать несколько источников термоЭДС, соединенных параллельно и подключенных к общей нагрузке. Для исследования электрических характеристик эквивалентной термоЭДС необходимо определить электрические характеристики отдельных источников термоЭДС.

Эквивалентные схемы для расчета характеристик эквивалентного источника термоЭДС при параллельном соединении двух источников термоЭДС представлены на рисунке 1. Расчет тока для двух соединенных параллельно источников термоЭДС можно осуществить методом наложения. Ток в цепи от первого источника ЭДС (рисунок 1б) можно найти из выражения:

$$I_1 = \frac{E_1}{R_{вн.1} + \frac{R_{вн.2} \cdot R_n}{R_{вн.2} + R_n}},$$

где  $I_1$  – ток первого источника термоЭДС;  $E_1$  – ЭДС первого источника;  $R_{вн.1}$  – внутреннее сопротивление первого источника ЭДС;  $R_{вн.2}$  – внутреннее сопротивление второго источника ЭДС;  $R_n$  – сопротивление нагрузки.

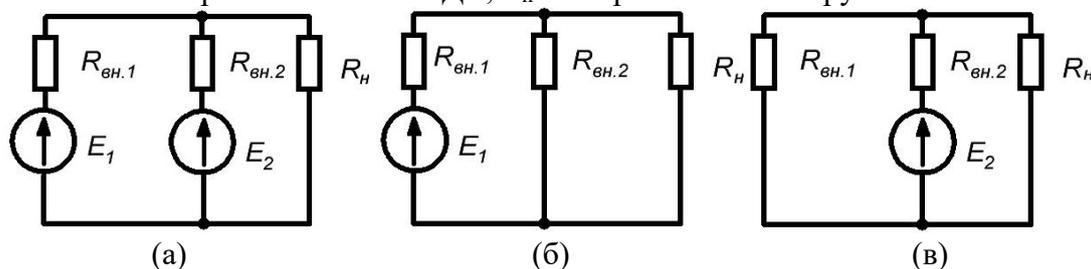


Рис. 1. Эквивалентная схема замещения источника термоЭДС,

(а) параллельное соединение двух источников термоЭДС, (б) эквивалентная схема для расчета тока от первого источника термоЭДС, (в) эквивалентная схема для расчета тока от второго источника термоЭДС

Ток в цепи от второго источника ЭДС (рисунок 1в) можно найти из выражения:

$$I_2 = \frac{E_2}{R_{вн.2} + \frac{R_{вн.1} \cdot R_n}{R_{вн.1} + R_n}},$$

где  $I_2$  – ток второго источника термоЭДС;  $E_2$  – ЭДС второго источника.

Результирующий ток  $I_p$  определяется как сумма токов от каждого источника:

$$I_p = I_1 + I_2.$$

Напряжение эквивалентного источника определяется током, протекающим через его внутреннее сопротивление:

$$E_{эkv} = I_p \cdot R_{вн},$$

где  $R_{вн}$  – внутреннее сопротивление эквивалентного источника термоЭДС;  $I_p$  – ток эквивалентного источника термоЭДС.

Внутреннее сопротивление эквивалентного термоэлектрического источника представляет собой параллельное соединение внутренних сопротивлений каждого источника:

$$R_{вн} = \frac{R_{вн.1} \cdot R_{вн.2}}{R_{вн.1} + R_{вн.2}}.$$

где  $R_{вн.1}$  – внутреннее сопротивление первого источника ЭДС;  $R_{вн.2}$  – внутреннее сопротивление второго источника ЭДС.

Предложена методика расчета эквивалентного источника при параллельном соединении источников термоЭДС методом наложения. Используя эту методику,

можно рассчитать ток и внутреннее сопротивление эквивалентного источника при любом количестве параллельно соединенных источников ЭДС. Исследование внутреннего сопротивления источника термоЭДС очень важно для последующего согласования измерительной цепи с термоэлектрическим датчиком.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Hu J. and Nagy P.B. On the role of interface imperfections in thermoelectric nondestructive materials characterization // Appl. Phys. Lett. – 1998.– vol. 73.–no.4– Pp. 467–469.
2. Stuart C. M. Thermoelectric differences used for metal sorting // Journal of Testing and Evaluation. – 1987. – vol. 15. – no. 4. – Pp. 224–230.
3. Cho M., Park S., Kwon E., Jeong S., Park K. A waste metal sorting system using LIBS classification // IEEE International Symposium on Industrial Electronics. – 2019. – vol. 2019. – Pp. 451–454.

#### **ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА СИСТЕМЫ ПРИ НАЛИЧИИ ТЕРМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ КОНТАКТНОЙ ПАРЫ**

Ю.Р. Колосова, А.А. Дементьев, А.И. Солдатов

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,  
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 40, 634050  
E-mail: julya.kolosova94@yandex.ru

#### **NUMERICAL STUDY OF HEAT TRANSFER OF SYSTEM IN THE PRESENCE A CONTACT THERMAL RESISTANCE OF THE CONTACT PAIR**

Yu.R. Kolosova, A.A. Dementiev, A.I. Soldatov

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,  
Tomsk, Lenin str., 40, 634050  
E-mail: julya.kolosova94@yandex.ru

***Annotation.** A mathematical model of heat transfer distribution in the case of non-ideal contact of two surfaces (electrode-sample system), which allows one to obtain the temperature distribution in coupled bodies at any time – from the initial contact time to the establishment of the stationary mode is developed.*

В настоящее время все материалы и сплавы, используемые при разработке промышленной техники, подвергаются тщательному входному контролю, однако используемые подходы устарели и требуют много времени и финансовых затрат. В связи с этим представляет интерес развитие новых способов анализа материалов и их свойств, среди которых перспективен метод, основанный на измерении термоЭДС. На данном методе осуществлена работа приборов контроля термоЭДС [1], которые при всех достоинствах имеют серьезный недостаток – высокую погрешность измерения при неидеальном контакте двух поверхностей вследствие неоднородностей в металлах и сплавах, неровностей поверхностей и т.д. Для исследования причин возникновения погрешности в приборах термоэлектрического контроля разработана одномерная математическая модель распространения тепла в случае неидеального контакта двух поверхностей, которая позволяет определить распределение температуры в связанных телах в динамике. Для модели выбраны электрод высотой  $l_1$  и исследуемый образец высотой  $l_2$ , соединенные между собой. В зоне контакта имеется зазор  $d$  вследствие неровностей материалов. Электрод нагревает исследуемый образец, а вся система находится в нормальных атмосферных условиях и охлаждается естественной конвекцией.