

## ЛАБОРАТОРНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ ПЕРЕХОДНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ КОНТАКТОВ

© 2022 г. А.А. Абоуеллаиль<sup>1,\*</sup>, Ц. Чан<sup>2,\*\*</sup>, А.И. Солдатов<sup>3,4,\*\*\*</sup>, А.А. Солдатов<sup>3,4,\*\*\*\*</sup>,  
М.А. Костина<sup>3,4,\*\*\*\*\*</sup>, С.И. Борталевич<sup>5,\*\*\*\*\*</sup>, Д.А. Солдатов<sup>3,\*\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Сфинкс университет, Региональная зона обслуживания, Новый Асьют 71515, Египет

<sup>2</sup>Институт перспективных исследований Шеньженского университета,  
Китай 3688, г. Шеньжень, пр. Нанхай

<sup>3</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия 634050 Томск, пр. Ленина, 30

<sup>4</sup>Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,  
Россия 634050 Томск, пр. Ленина, 40

<sup>5</sup> Институт проблем рынка РАН, Россия 117418 Москва, Нахимовский пр-т, 47

E-mail: \*ahmed.abouellail@sphinx.edu.eg; \*\* jiangleichang@foxmail.com; \*\*\* asoldatof@tpu.ru; \*  
\*\*\* soldatov.88@bk.ru; \*\*\*\*\* mariyakostina91@mail.ru; \*\*\*\*\* 680097@inbox.ru; \*\*\*\*\* dimasoldatov@sibmail.com

Поступила в редакцию 04.10.2022; после доработки 28.10.2022

Принята к публикации 28.10.2022

Приведены результаты моделирования нагрева переходного сопротивления контакта двух проводников при протекании тока, показано, что его температура может достигать значений сравнимых с температурой плавления и воспламенения изоляции. При этом контроль контактного сопротивления современными способами затруднен. Предложен термоэлектрический метод контроля переходного сопротивления контактов, проведено его моделирование и лабораторные исследования на контактном соединении двух типов проводников: алюминий—медь, образующих термопару в силовой сети. Проведены лабораторные исследования термоэлектрических свойства контактного соединения из алюминия и меди при температуре 300 °С.

*Ключевые слова:* метод термоэлектродвижущей силы, контактное переходное сопротивление, воспламенение изоляции, испытание контактного сопротивления, коэффициент Зеебека, термопара.

DOI: 10.31857/S0130308222120077, EDN: BVCDTM

### ВВЕДЕНИЕ

Важнейшей составляющей национальных интересов является обеспечение безопасности личности, общества и государства в условиях чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера и их последствий. Согласно статистике, в 2021 году в России случилось 57390 пожаров, произошедших вследствие нарушения правил устройства и эксплуатации электрооборудования и бытовых электроприборов, погибло 2289 человека, еще 2545 было травмировано. Причиненный материальный ущерб составил 15 244,7 млн рублей [1].

Существующие системы мониторинга состояния электросети ориентированы, в основном, на мониторинг объемов потребления электроэнергии, качества питающего напряжения и наличия аварийных ситуаций. Одной из трудно решаемых задач в этой области — это контроль большого переходного сопротивления (БПС) контактов, которые являются одной из причин пожаров в электроустановках.

Переходные сопротивления образуются в местах соединения проводников между собой, а также в местах присоединения проводников к машинам, аппаратам, приборам. В нормативных документах указано, что величина переходного сопротивления, которое регламентируется РД 34.45-51.300-97 и ПТЭЭП, не должна превышать 0,05 Ом (во взрывоопасных помещениях и зонах переходное сопротивление контактов должно быть не более 0,03 Ом). БПС возникают в местах плохих контактов за счет уменьшения усилия сжатия проводников в процессе эксплуатации, например, при протекании импульсных ударных токов при коротких замыканиях или пусках электродвигателей, длящихся десятые доли секунды [2], величина которых существенно превышает рабочие токи, что приводит к резкому повышению температуры проводников в контактном соединении и соответствующему увеличению размеров проводника и их последующей деформации [3, 4] или из-за вибрации проводника [5], малой поверхности контакта за счет шероховатости, неплотного контакта и неровностей в местах соединения и оконцевания проводов (особенно при наличии вибрации оборудования), уменьшение сечения в месте соединения, окисление металлов [6], которое часто возникает в сырых, особо сырых или с химически активной средой помещениях.

Наличие контактного сопротивления отмечается многими исследователями, в том числе предлагаются различные методы его уменьшения [7—22]. В этом случае площадь действительного соприкосновения уменьшается, сопротивление в данном месте увеличивается. Увеличивается количество выделяющегося в этом месте тепла. Возникает локальный перегрев, что может приводить к воспламенению изоляции и сгораемых элементов конструкций и в конечном итоге стать причиной отказа электросети [23, 24]. Особенность БПС усугубляется тем, что их трудно обнаружить, а аппараты защиты по току не срабатывают, т.к. ток в цепи не увеличивается, а уменьшается.

Обнаруживают БПС обычно уже тогда, когда оно стало причиной отказа. Поэтому особое значение приобретают мероприятия, направленные на то, чтобы не допустить появления БПС. Это возможно при их своевременном обнаружении в контролируемой цепи и устранение причины их возникновения. Однако профилактика БПС является очень трудоемкой задачей и на сегодняшний день выполняется только вручную, путем механической разборки контактного соединения. Температуру контактного соединения можно контролировать термонаклейками, которые выпускают как зарубежные, так и отечественные производители, например, компания ИНТЕМ. Электронных приборов непрерывного мониторинга БПС в настоящее время не существует. Применение термонаклеек не спасает положение, т.к. ежедневный осмотр трудозатратен, а при периодическом осмотре возможен пропуск аварийной ситуации. Кроме того, они являются одноразовыми и после срабатывания требуют замены. Поэтому существует актуальная задача по разработке научно обоснованных подходов к созданию методов и приборов контроля переходного сопротивления контактов.

В настоящее время измерение переходных сопротивлений контактных соединений производится микроомметрами или контактомерами, т.е. специальными приборами для измерения малых сопротивлений. Не каждый электротехнический персонал имеет такое оборудование, поэтому сопротивление в соединителях, разветвителях и т.п. не измеряется.

Поэтому задача представленной статьи провести теоретический анализ и лабораторные исследования возможности применения термоэлектрического метода для мониторинга переходного сопротивления контактов, в действующей сети электроснабжения без отключения потребителей, в режиме реального времени. Термоэлектрический метод нашел применение в неразрушающем контроле металлов и сплавов [25—38], а для контроля переходного сопротивления контактов ранее не применялся.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В электрической сети встречаются кабели из двух металлов: алюминия и меди, а так же их сплавы. Проводники электрических кабелей производятся из электролитической меди марки CU-M-03-W и CU-M-02-W, которая отличается наличием примесей 0,1 % в CU-M-03-W и 1 % в CU-M-02-W [39]. Различные добавки к меди могут снижать ее проводящую способность, увеличивать прочность либо придавать различные свойства.

Для электрических проводников из алюминия применяют марки АА-1350 и АА-8000 с добавками железа и кремния в объеме 0,05 %. Эти примеси ухудшают проводимость, но повышают механическую прочность проводника [40].

Электрическая сеть может быть как из одного типа металлов (например, из алюминия) или может состоять из соединения различных типов: алюминий—медь. Соединение проводников может быть различным: клеммная колодка, болтовое соединение, припой, сварка, обжим. Соединители, разветвители являются слабыми местами в электропроводке и обладают большими переходными сопротивлениями, чем сами проводники. При протекании тока через контакт из-за высокого переходного сопротивления выделяется тепло и контакт нагревается. Электрическая сеть, имеющая соединители или разветвители, можно представить в виде термодары, имеющей два разных проводника, спаи которых имеют разную температуру.

## МЕТОД РЕШЕНИЯ

При протекании тока через переходное сопротивление контакта на нем выделится тепло и по эффекту Зеебека [41] появится термоЭДС в виде постоянного напряжения, величина которого прямо пропорциональна разности температур контактов проводника [42]:

$$E = \int_{T_1}^{T_2} [S_1(T) - S_2(T)] dT, \quad (1)$$

где  $T_2$  и  $T_1$  — температура горячего и холодного контакта соответственно;  $S_1$  и  $S_2$  — коэффициенты Зеебека для первого и второго материала соответственно.

Если температура горячего и холодного контактов изменяются в небольшом интервале, можно считать изменение коэффициентов Зеебека линейным и использовать более простое выражение:

$$E = (S_1 - S_2) \cdot (T_2 - T_1). \quad (2)$$

Мощность, выделяемая на контактном соединении, можно определить из тока и сопротивления:

$$P = I^2 R. \quad (3)$$

Из закона Джоуля — Ленца можно вычислить выделяемое тепло:

$$dQ = P \cdot dt = I^2 \cdot R \cdot dt, \quad (4)$$

где  $dQ$  — количество тепла;  $I$  — действующее значение силы тока, через проводник;  $R$  — величина контактного сопротивления;  $t$  — время протекания тока.

Часть этого тепла нагревает контактное сопротивление, что приводит к повышению его температуры, а оставшаяся часть отводится за счет теплоотдачи.

Тепло идущее на нагрев контактного сопротивления можно определить из выражения:

$$dQ_1 = m \cdot c \cdot \Theta, \quad (5)$$

где  $m$  — вес контакта;  $c$  — удельная теплоемкость материала контакта;  $\Theta$  — перегрев (превышение температуры контакта над температурой окружающей среды):

$$\Theta = T - T_0, \quad (6)$$

где  $T$  и  $T_0$  — температуры контакта и окружающей среды соответственно.

Тепло, рассеиваемое контактом за время  $dt$ , определяется из формулы:

$$dQ_2 = K \cdot S \cdot (T - T_0) \cdot dt = K \cdot S \cdot \Theta \cdot dt, \quad (7)$$

где  $K$  — общий коэффициент теплоотдачи, учитывающий все ее виды;  $S$  — поверхность охлаждения контакта.

Уравнение теплового баланса имеет вид:

$$dQ = dQ_1 + dQ_2. \quad (8)$$

Учитывая (4)—(6), уравнение теплового баланса примет вид:

$$I^2 \cdot R \cdot dt = m \cdot c \cdot \Theta + K \cdot S \cdot \Theta \cdot dt. \quad (9)$$

После преобразования:

$$\frac{I^2 \cdot R}{m \cdot c} = \frac{d\Theta}{dt} + \frac{K \cdot S}{m \cdot c} \cdot \Theta. \quad (10)$$

Если изменение температуры проводника происходит в небольшом диапазоне, то можно считать, что  $R$ ,  $c$ ,  $K$  будут константами. Получаем решение дифференциального уравнения (10):

$$\Theta = A \cdot e^{\frac{K \cdot S}{m \cdot c} t} + \frac{I^2 \cdot R}{K \cdot S}, \quad (11)$$

где  $A$  — постоянная, определяемая начальными условиями.

Начальным условием является равенство температур контакта и окружающей среды при  $t = 0$ . Отсюда можно найти постоянную  $A$ :

$$A = -\frac{I^2 \cdot R}{K \cdot S}. \quad (12)$$

С учетом (12) выражение (11) будет выглядеть как

$$\Theta = T - T_0 = \frac{I^2 \cdot R}{K \cdot S} \cdot \left(1 - e^{-\frac{K \cdot S}{m \cdot c} t}\right). \quad (13)$$

Выражение (13) описывает зависимость температуры проводника от времени. Если в уравнении (13) принять время  $t = \infty$ , то можно найти установившееся значение:

$$\Theta_{t=\infty} = T_{t=\infty} - T_0 = \frac{I^2 \cdot R}{K \cdot S}, \quad (14)$$

где  $T_{t=\infty}$  — установившаяся температура контакта;  $\Theta_{t=\infty}$  — установившееся значение превышения температуры контакта над температурой окружающей среды.

Преобразовав (14), получим:

$$I^2 \cdot R = K \cdot S \cdot (T_{t=\infty} - T_0). \quad (15)$$

Из уравнения (15) видно, что в установившемся режиме все выделяющееся в контакте тепло будет отдаваться в окружающее пространство.

Обозначив  $X = \frac{m \cdot c}{K \cdot S}$ , получим более простой вид уравнения нагрева:

$$\Theta = T - T_0 = \Theta_{t=\infty} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{X}}\right). \quad (16)$$

Величина  $X = \frac{m \cdot c}{K \cdot S}$  называется постоянной времени нагрева и представляет собой отношение теплопоглощающей способности тела к его теплоотдающей способности.

Хотя из уравнения нагрева следует, что установившийся режим наступает через неограниченно длительное время, на практике время достижения установившейся температуры принимают равным  $(3 \dots 4)X$ , так как при этом температура нагрева составляет более 98 % своего окончательного значения  $\Theta_{t=\infty}$ .

Используя выражение (16), было проведено моделирование процесса нагрева контактного сопротивления. Результаты моделирования нагрева контакта из меди приведены на рис. 1 и рис. 2. При расчете масса контакта варьировалась от 1 до 3 г; переходное сопротивление контакта варьировалось от 0,01 до 1; ток, протекающий через контакт, равен 10 А; удельная теплоемкость меди  $c = 385$  Дж/(кг·К).

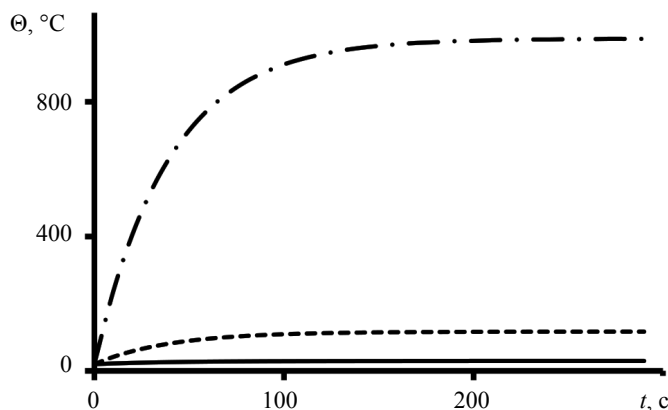


Рис. 1. Результаты моделирование процесса нагрева контактного сопротивления массой 2 г и сопротивлением 0,01 (сплошная линия), 0,1 (штриховая линия) и 1 Ом (штрихпунктирная линия).

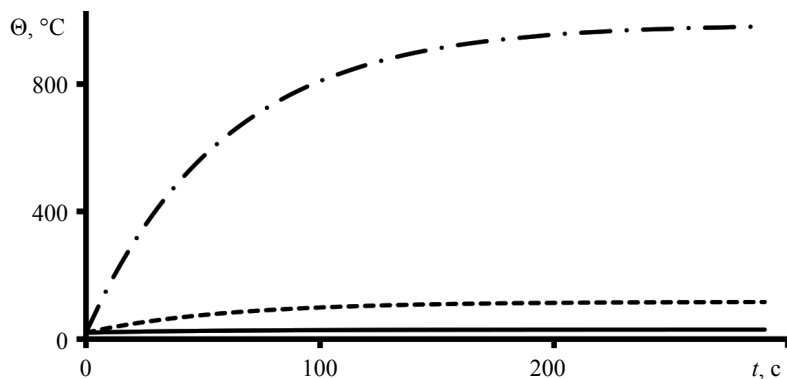


Рис. 2. Результаты моделирование процесса нагрева контактного сопротивления массой 3 г и сопротивлением 0,01 (сплошная линия), 0,1 (штриховая линия) и 1 Ом (штрихпунктирная линия).

При увеличении массы контакта в 2 г переходной процесс займет около 200 с (см. рис. 1).

В установившемся режиме температура контакта увеличится на 1000 град через 100 с при токе 10 А и сопротивлении 1 Ом. Если сопротивление контакта будет 0,1 Ом, то температура увеличится на 115 и на 30 град при сопротивлении 0,01 Ом. Чем меньше величина контактного сопротивления, тем быстрее заканчивается переходной процесс.

При увеличении массы контакта до 3 г переходной процесс займет около 300 с (см. рис. 2). Значения температур для контактных сопротивлений 0,1 и 0,01 Ом будут одинаковыми как для контактного сопротивления массой 2 г.

Из анализа рис. 1 и 2 можно сделать вывод, что увеличение температуры будет продолжаться, достигая максимального значения в момент равенства мощности нагрева и потерь на излучение и конвекцию. Максимальная величина может достигать значения близкого к температуре плавления изоляции и последующему возгоранию (рис. 3).



Рис. 3. Пример плавления изоляции.

Например, температура самовоспламенения полиэтиленовой изоляции составляет 350 °C. Изоляция из ПВХ подвержена обугливанию и материал становится полупроводником при кратковременном воздействии (около 10 ч) температурой 160 °C. Более длительное воздействие (около 1 месяца) может привести к отказам при температурах до 110 °C [43, 44].

Изменение температуры контактного сопротивления приводит к появлению термоЭДС в соответствии с выражением (2). Результаты расчета термоЭДС для контактной пары медь—алюминий сопротивлением 1 Ом и массой 1, 2 и 3 г представлены на рис. 4.

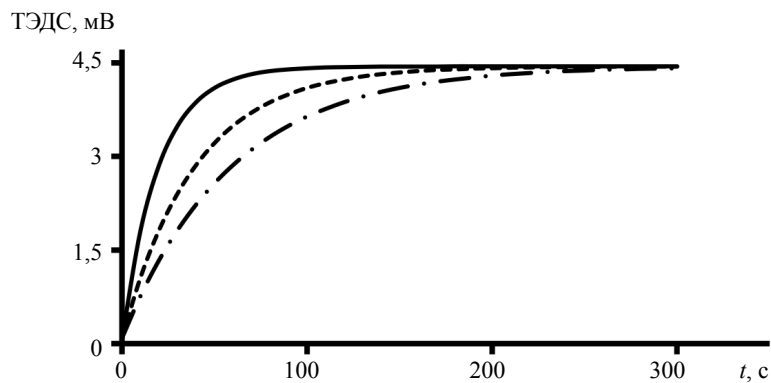


Рис. 4. Зависимость термоЭДС от времени нагрева для контактной пары медь—алюминий сопротивлением 1 Ом и массой 1 (сплошная линия), 2 (штриховая линия) и 3 г (штрихпунктирная линия).

С увеличением массы контактного соединения увеличивается время его нагрева, в то же время максимальное изменение температуры и соответственно термоЭДС остаются практически одинаковыми, т.е. не зависят от массы контактного соединения.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для подтверждения результатов моделирования были проведены экспериментальные исследования в силовой сети. Для исключения влияния различных нагрузок в силовой сети, был использован развязывающий трансформатор с коэффициентом передачи  $k = 1$ . Для разделения напряжения силовой сети и термоЭДС был использован фильтр низких частот с частотой среза около 0,5 Гц. В качестве нагрузки использовали десять ламп накаливания общей мощностью 950 Вт.

Экспериментальная установка (рис. 5) включала в себя трансформатор мощностью 1000 Вт с коэффициентом трансформации 1. Вторичная цепь состоит из нагрузки с последовательно подключенными измерительным амперметром и контактным соединением алюминий—медь, у которого коэффициент Зеебека по разным источникам составляет (3,6...4,5) мкВ/град [45, 46]. Контактное соединение двух проводников выполнили с помощью клеммной колодки, предварительно медный проводник нагревали в печи для получения окисной пленки, сопротивление которой составило 0,89 Ом, его измеряли с помощью мультиметра Rigol DM3068, который позволяет измерять сопротивление в диапазоне 200 Ом, с дискретностью 100 мОм и погрешностью измерения  $\pm 0,014$  %. При протекании переменного тока, контактное сопротивление нагрелось до температуры  $(300 \pm 5)$  °С, которую контролировали бесконтактным способом с помощью пирометра DT-811. При этом в цепи появилась термоЭДС. Ее измеряли на выходе фильтра низких частот мультиметром Rigol DM3068, который позволяет измерять постоянное напряжение от 10 мкВ, с погрешностью измерения  $\pm 0,004$  %.

Измерение термоЭДС проводили 2 раза в секунду в течение 5 мин. Вначале измерили термоЭДС во вторичной цепи без подключения трансформатора к силовой сети (около 20 с). Затем первичную обмотку трансформатора подключили к силовой сети и измеряли термоЭДС. На каждом

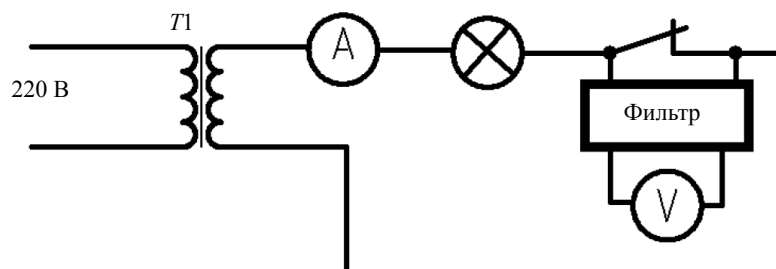


Рис. 5. Схема экспериментальной установки.

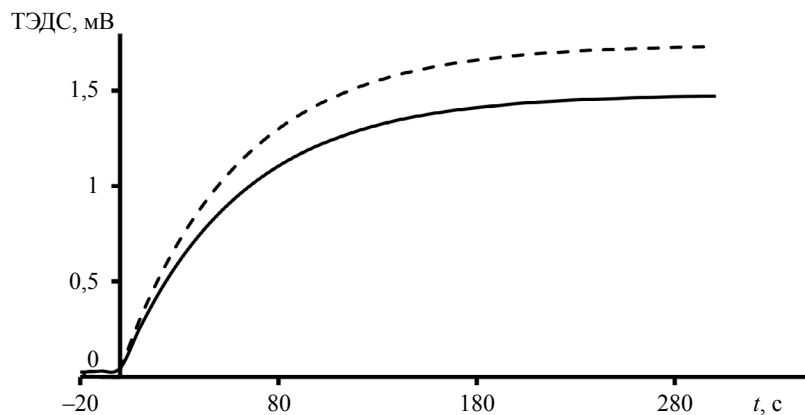


Рис. 6. Динамика изменения термоЭДС в цепи: сплошная линия — экспериментальные исследования (среднее значение по 10 измерениям); штриховая линия — результаты моделирования.

этапе измеряли термоЭДС и одновременно контролировали температуру контакта и ток нагрузки. Результаты экспериментальных исследований приведены на рис. 6. Доверительный интервал не превышает 8 %. Здесь же для сравнения приведены результаты моделирования. Для удобства сравнения экспериментальных значений с расчетными, начало координат для экспериментальных значений сдвинули на 20 с, совместив с началом нагрева.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из рис. 6 видно, что величина термоЭДС при 300 °С составила 1,7 мВ. Расчетное значение составляет 1,42 мВ. Отличие обусловлено возможным наличием примесей в используемых материалах контактного соединения медь—алюминий и соответственно другим коэффициентом Зеебека. Изменение полярности включения термопары, которая образована контактным соединением двух проводников: медь—алюминий, прогнозируемо привело к смене полярности термоЭДС. Можно сделать вывод, что появление постоянной составляющей в цепи переменного тока обусловлено только наличием термоЭДС нагретого контактного соединения (термопары) медь—алюминий. Следует отметить, что нагрузка в сети переменного тока была резистивная, в схеме отсутствовали реактивные элементы (конденсаторы и индуктивности). Мониторинг тока нагрузки показал его постоянное значение при всех изменениях термоЭДС. Это связано с тем, что величина переменного тока в сотни раз больше величины постоянного тока.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Электрическая сеть состоит из множества соединений, разветвлений и нагрузок разного характера. Места контактов имеют значительно большее сопротивление, чем сам проводник, и протекающий ток будет нагревать место контакта сильнее самого проводника. Поэтому, с учетом разного типа металлов, используемых в контактных соединениях, в цепи будет появляться термоЭДС, величина которой будет зависеть от температуры контактного соединения и марки используемых металлов и сплавов. Проведенные теоретические и лабораторные исследования показали, что возникающую термоЭДС в электрической цепи переменного тока можно детектировать и использовать для мониторинга контактного соединения. Однако область применения термоэлектрического метода в настоящее время ограничена его проверкой в лабораторных условиях.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чечетина Т.А., Гончаренко В.С., Сибирко В.И., Загуменнова М.В. Обстановка с пожарами в российской федерации в 2021 году // Пожарная безопасность. 2022. № 1 (106). С. 98—115.
2. Титков В.В., Бекбаев А.Б., Сарсенбаев Е.А. О возможностях мониторинга нестационарных тепловых процессов в контактах силовых электроустановок // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2017. Т. 23. № 1. С. 168—178.
3. Чалый А.М., Дмитриев В.А., Павлейно М.А., Павлейно О.М. Нагрев силовоточных электрических контактов ударными токами короткого замыкания // Электронная обработка материалов. 2013. № 49 (5). С. 81—88.

4. Чалый А.М., Дмитриев В.А., Павлейно М.А., Павлейно О.М., Сафонов М.С. Об особенностях сваривания и разрушения поверхности сильноточных контактов импульсными токами // *Электронная обработка материалов*. 2016. № 52 (6). С. 12—18.
5. Троицкий О.А., Сташенко В.И., Скворцов О.Б. Вибрации проводников при пропускании импульсного электрического тока и неразрушающий контроль // *Инженерный журнал: наука и инновации*. Электронное научно-техническое издание. 2018. № 3. DOI: 10.18698/2308-6033-2018-3-1741
6. Чупрова Л.В., Ершова О.В., Муллина Э.Р. Химико-технологические аспекты проблемы окисления медных контактов электрооборудования, эксплуатируемого в цехах очистки воды // *Молодой ученый*. 2013. № 9 (56). С. 77—80.
7. Apostolakis G., Kazarians M., Bley D.C. Methodology for assessing the risk from cable fires // *Nucl. Saf.* 1982. V. 23. Is. 4. ID 5329326.
8. Delplace M., Vos E. Electric short circuits help the investigator determine where the fire started // *Fire Technology*. 1983. V. 19. Is. 3. P. 185—191.
9. Wang J., Wu Z., Mao C., Zhao Y., Yang J., Chen Y. Effect of electrical contact resistance on measurement of thermal conductivity and wiedemann-franz law for individual metallic nanowires // *Scientific Reports*. 2018. V. 8. Is. 1. ID 23291.
10. Kim S.-W., Kim S.-H., Kim G.-S., Choi C., Choi R., Yu H.-Y. The Effect of Interfacial Dipoles on the Metal-Double Interlayers-Semiconductor Structure and Their Application in Contact Resistivity Reduction // *ACS Applied Materials and Interfaces*. 2016. V. 8. Is. 51. P. 35614—35620.
11. Khoo K.H., Leong W.S., Thong J.T.L., Quek S.Y. Origin of Contact Resistance at Ferromagnetic Metal-Graphene Interfaces // *ACS Nano*. 2016. V. 10. Is. 12. P. 11219—11227.
12. Dillig M., Biedermann T., Karl J. Thermal contact resistance in solid oxide fuel cell stacks // *Journal of Power Sources*. 2015. V. 300. P. 69—76.
13. Münzenrieder N., Salvatore G.A., Petti L., Zysset C., Büthe L., Vogt C., Cantarella G., Tröster G. Contact resistance and overlapping capacitance in flexible sub-micron long oxide thin-film transistors for above 100 MHz operation // *Applied Physics Letters*. 2014. V. 105. Is. 26. ID 263504.
14. Alhazmi N., Ingham D.B., Ismail M.S., Hughes K., Ma L., Pourkashanian M. The through-plane thermal conductivity and the contact resistance of the components of the membrane electrode assembly and gas diffusion layer in proton exchange membrane fuel cells // *Journal of Power Sources*. 2014. V. 270. P. 59—67.
15. Kwiatkowski R., Vladimirescu M., Zybura A. Contact resistance anomalies in reed contacts - Influence of temperature and external magnetic field // *HOLM*. 2013. ID 6651403.
16. Ren W., Chen Y., Cao S., Cui L., Liang H. A new automated test equipment for measuring electrical contact resistance of real size rivets // *HOLM*. 2013. ID 6651396.
17. Мозгалин Н.Ф. Электропроводящие смазки — надежная мера снижения аварийности в сетях и уменьшения потерь в электрических контактах // *Промышленная энергетика*. 2010. № 11. С. 12—16.
18. Беляев В.Л., Шалагинов А.А. Исследование влияния электропроводящих смазок на сопротивление сильноточных контактных систем электролизеров и электрических аппаратов // *Промышленная энергетика*. 2014. № 5. С. 34—37.
19. Sivkov A.A., Shanenkova Y.L., Saygash A.S., Shanenkov I.I. High-speed thermal plasma deposition of copper coating on aluminum surface with strong substrate adhesion and low transient resistivity // *Surface and Coatings Technology*. 2016. V. 292. P. 63—71.
20. Беляев В.Л., Куклев Ю.В., Шалагинов А.А. Математическое моделирование полного переходного сопротивления идеализированного сильноточной контактной системы электролизеров и электрических аппаратов // *Электротехника*. 2014. № 2. С. 35—37.
21. Сивков А.А., Сайгаш А.С., Колганова Ю.Л. Влияние свойств медного покрытия на алюминиевой контактной поверхности на переходное сопротивление // *Электротехника*. 2013. № 8. С. 11—14.
22. Колганова (Шаненкова) Ю.Л., Шаненков И.И., Сайгаш А.С. Влияние микрогеометрии поверхности на величину удельного переходного контактного сопротивления / *Современные техника и технологии: сборник трудов XIX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых*. В 3 т. Томск, 15—19 Апреля 2013. Томск: ТПУ, 2013. Т. 1. С. 54—55.
23. Jiang Z.-F., Xue F., Gou X.-F. Influences of the Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>x</sub>/Ag interface and interfilamentary bridge connections on AC loss of composite wires // *Physica C: Superconductivity and its Applications*. 2018. V. 547. P. 69 — 76.
24. Cong S., Zhang W.W., Wang Y.S., Wen Z.J., Tian Y.H. Effect of heat input on failure mode and connection mechanism of parallel micro-gap resistance welding for copper wire // *Int. J. of Advanced Manufacturing Technology*. 2018. V. 96. P. 299 — 306.
25. Abouellail A.A., Obach I.I., Soldatov A.A., Soldatov A.I. Surface inspection problems in thermoelectric testing // *MATEC Web Conf*. 2017. V. 102. ID 01001.
26. Soldatov A.I., Soldatov A.A., Sorokin P.V., Loginov E.L., Abouellail A.A., Kozhemyak O.A., Bortalevich S.I. Control system for device «thermotest» / *2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*. 2016. ID 7491869.



27. *Soldatov A.I., Soldatov A.A., Sorokin P.V., Abouellail A.A., Obach I.I., Bortalevich V.Y., Shinyakov Y.A., Sukhorukov M.P.* An experimental setup for studying electric characteristics of thermocouples / 2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). 2017. ID 7998534.
28. *Soldatov A.I., Soldatov A.A., Kostina M.A., Kozhemyak O.A.* Experimental studies of thermoelectric characteristics of plastically deformed steels ST3, 08KP and 12H18N10T // *Key Engineering Materials*. 2016. V. 685. P. 310 — 314
29. *Soldatov A.A., Dement'ev A.A., Soldatov A.I., Vasil'ev I.M.* Control of Quality of Applying Heat-Conducting Compound // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2020. V. 56 (3). P. 284—290
30. *Soldatov A.A., Seleznev A.I., Fiks I.I., Soldatov A.I., Kröning Kh.M.* Nondestructive proximate testing of plastic deformations by differential thermal EMF measurements // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2012. V. 48 (3). P. 184—186.
31. *Ismailov T.A., Yevdulov O.V., Nasrulaev A.M.* A Mathematical Model of a Thermoelectric Device for Extracting Foreign Objects from the Human Body by Freezing / *Biomedical Engineering*. 2021. V. 55 (3). P. 219—223.
32. *Kikuchi M.* Dental alloy sorting by the thermoelectric method // *European Journal of Dentistry*. 2010. V. 4. No. 1. P. 66—70.
33. *Ismailov T.A., Yevdulov O.V., Mispakhov, I.S., Adamov A.P.* A Thermoelectric Refrigerator for Short-Term Storage and Transportation of Biological Materials // *Biomedical Engineering*. 2020. V. 54 (4). P. 240—243.
34. *Ismailov T.A., Ragimova T.A., Khazamova M.A.* Research on a thermoelectric device for thermopuncture // *Journal of Thermoelectricity*. 2017. No. 1. P. 29—33.
35. *Carreon Héctor.* Thermoelectric Detection of Fretting Damage in Aerospace Materials // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2014. V. 50. No. 11. P. 684—692.
36. *Ismailov T.A., Yevdulov O.V., Ragimova T.A., Nabiev N.A.* A Thermoelectric Device to Stop Bleeding // *Biomedical Engineering*. 2019. V. 53 (2). P. 92—96.
37. *Абуеллаиль А.А., Солдатов А.А., Сорокин П.В., Солдатов А.И., Хан В.* Исследование характеристик термоэлектрических источников ЭДС // *Дефектоскопия*. 2018. № 7. С. 54—60.
38. *Stuart C.* Thermoelectric Differences Used for Metal Sorting // *Journal of Testing and Evaluation*. 1987. V. 15. No. 4. P. 224—230. doi.org/10.1520/JTE11013J. ISSN 0090-3973
39. Copper-wire-7440-50-8. Available at: <https://www.americanelements.com/copper-wire-7440-50-8/>, free. (Accessed: December 16, 2021.)
40. Aluminum-alloy-1350. Available at: <https://www.americanelements.com/aluminum-alloy-1350/>, free. (Accessed: December 16, 2021.)
41. *de Boor Johannes, Mueller Eckhard.* Data analysis for Seebeck coefficient measurements // *The Review of scientific instruments*. 2013. V. 84. No. 6. ID 065102. DOI: 10.1063/1.4807697
42. *Binguier E.* The thermodynamical foundation of electronic conduction in solids // *European Journal of Physics*. 2018. V. 39. Is. 2. ID 025101.
43. *Courty L., Garo J.P.* External heating of electrical cables and auto-ignition investigation // *Journal of Hazardous Materials*. 2016. V. 321. No. 9. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2016.09.042
44. *Wang Zhi, Wang Jian.* Comparative thermal decomposition characteristics and fire behaviors of commercial cables // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2020. V. 144. No. 7. P. 1—3. DOI: 10.1007/s10973-020-10051-z
45. *Moore J.P.* Absolute Seebeck coefficient of platinum from 80 to 340 K and the thermal and electrical conductivities of lead from 80 to 400 K // *Journal of Applied Physics*. 1973. V. 44 (3). P. 1174—1178. DOI:10.1063/1.1662324
46. *Muhammad I U.K., Umar S.* Experimental Performance Investigations and Evaluation of Base Metals Thermocouples // *International Journal of Modern Applied Physics*. 2013. V. 3. No. 1. P. 26—37.