

Оценка тока плавления замкнутых сильноточных электрических контактов при импульсном нагреве

© М.А. Павлейно, О.М. Павлейно, М.С. Сафонов

Санкт-Петербургский государственный университет, физический факультет,
198504 Старый Петергоф, Санкт-Петербург, Россия
e-mail: s.pavleino@yandex.ru

Поступило в Редакцию 16 июля 2025 г.

В окончательной редакции 3 сентября 2025 г.

Принято к публикации 4 сентября 2025 г.

На основе обобщения большого числа экспериментальных данных предложена оценочная формула, позволяющая определить величину минимального тока плавления замкнутых контактов ударными токами короткого замыкания. Проведена оценка точности получающихся результатов, позволяющая сделать вывод о возможности применения данной формулы для проведения практически значимых расчетов.

Ключевые слова: токи короткого замыкания, контактные пятна, ток плавления, холодные контакты.

DOI: 10.61011/JTF.2026.02.62297.137-25

Введение

При возникновении аварий в электросетях токи короткого замыкания (КЗ) протекают через замкнутые контакты в течение нескольких десятков периодов до тех пор, пока система защиты не идентифицирует возникающий ток как аварийный и контакты не будут разведены [1,2]. При этом в первом полупериоде возможно наличие броска тока (ударный ток КЗ I_{SC}), величина которого может почти вдвое превосходить установившееся значение аварийного тока $I_{SC} : I_{IC} \approx 1.8I_{SC}$ [3,4]. Наличие такого броска тока приводит к кратковременному повышенному выделению мощности. Выделяющееся при этом тепло приводит к локальному нагреву окрестности контактных пятен (КП) — тепловой фронт не успевает переместиться на расстояние более 3–4 радиусов КП за время нарастания тока от начала КЗ до первого максимума [5]. Это вызывает резкий скачок температуры КП, которая может достичь значения температуры плавления T_m .

Плавление КП практически всегда ведет к возникновению фатальных сварок контактов и потере работоспособности электрических аппаратов. Это делает актуальным вопрос о том, как при разработке контактов оценивать величину тока, при которой начинается их плавление. Такое значение тока обозначим I_m .

Способ оценки тока плавления будем искать на основе обобщения экспериментальных данных о нагреве контактов при пропускании через них импульсных токов, представляющих собой синусоидальное колебание, затухающее в течение нескольких периодов. Блок-схема экспериментальной установки [5] приведена на рис. 1, a.

Она представляет собой батарею высоковольтных конденсаторов С большой емкости, которая соединена с исследуемыми контактами через трансформатор Тр. Ток, который пропускается через контакты, формиру-

ется колебательным контуром, образуемым батареей конденсаторов и первичной обмоткой трансформатора (рис. 1, b). Амплитуда тока в первом полупериоде может изменяться в диапазоне 0–100 kA. Ее величина зависит от уровня заряда конденсаторной батареи. Ток протекает через пару исследуемых контакт-ток плавления деталей. Нижняя закреплена неподвижно, а к верхней с помощью механического привода прикладывалась сила контактного нажатия, величина которой могла варьироваться в пределах $F_{CP} = 0 – 2500$ N. Имеются три канала для измерения тока, протекающего через контакты $I(t)$, напряжения на них $U_c(t)$ и силы контактного нажатия $F_{CP}(t)$.

В качестве неподвижных контакт-деталей (рис. 2) были использованы массивные цилиндры диаметром 20 и 40 mm с плоским торцом или проводящие шины толщиной от 2 до 10 mm. Верхние подвижные контакт-детали представляли собой цилиндры диаметром 5, 20 и 40 mm со сферической или конусообразной контактирующей поверхностью, а также с поверхностью, напоминающей жало мощного паяльника. Таким образом, контактирующие поверхности были типа „плоскость–сфера“, „плоскость–конус“ или „плоскость–жало“. В результате механического взаимодействия формируется КП круглой или нитевидной формы. В случае применения в качестве нижних электродов плоских шин имелась возможность перемещения верхних электродов вдоль оси симметрии шины от ее центра к краю.

В работах [5–11] описан метод расчета нагрева контактов импульсными токами, основанный на экспериментально измеренных осциллограммах тока, протекающего через контакты $I(t)$ и контактной разности потенциалов $U_c(t)$. Он позволяет рассчитать распределение температуры в контактной окрестности во время протекания тока в широком диапазоне температур

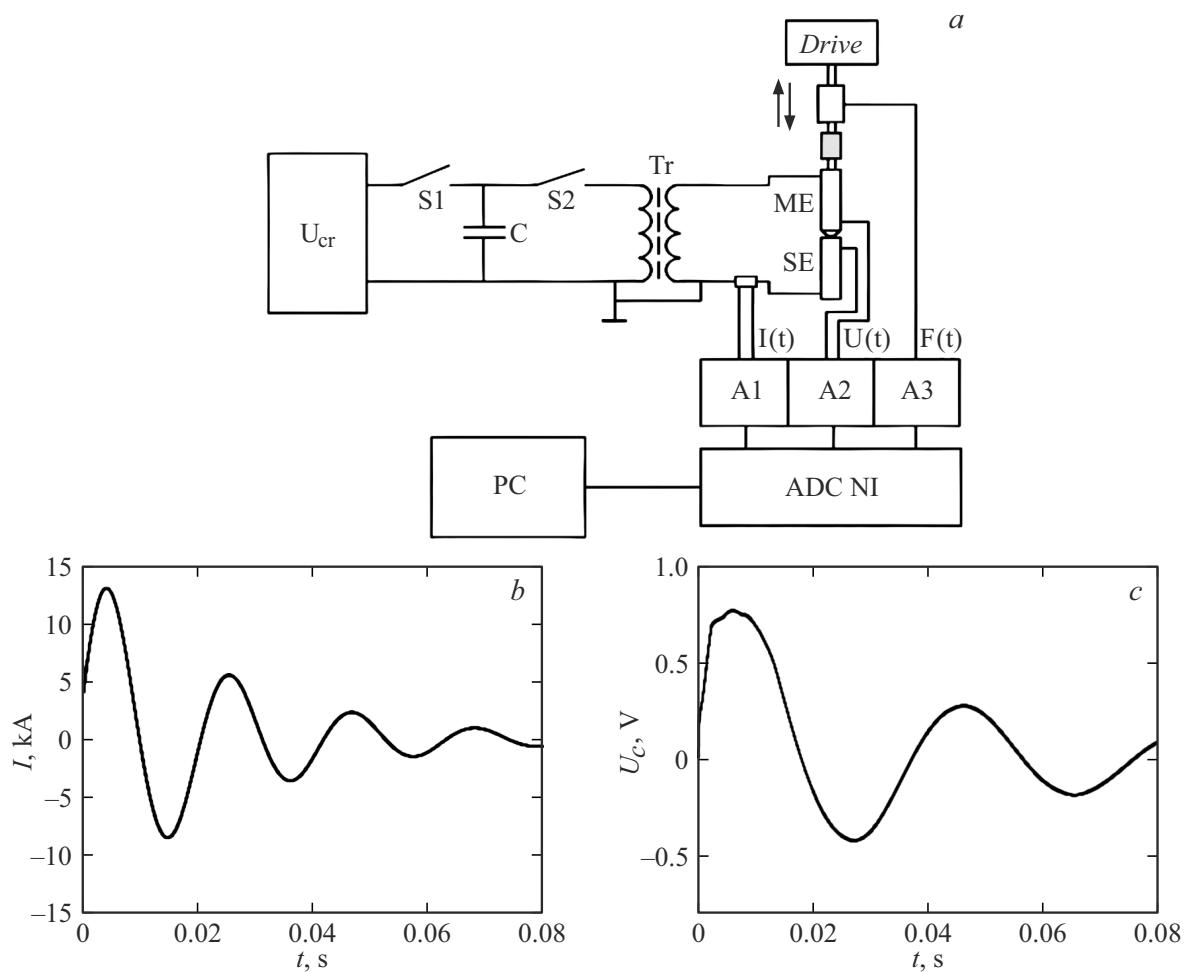


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки (a), типовая осциллограмма генерируемого тока (b), осциллограмма падения напряжения на контактах (c).

вплоть до температуры плавления. Для проведения расчетов отсутствует необходимость многократного решения механической контактной задачи для определения изменения во времени размера контактных пятен. Эта информация получается из знания зависимости $U_c(t)$.

Проведены многочисленные расчеты нагрева осесимметричных цилиндрических контактов. Их результаты показывают, что нагреву контактов до T_m и началу процесса плавления соответствует появление особенности на осциллограмме контактного напряжения, когда рост величины $U_c(t)$ прекращается при растущем токе. Такая осциллограмма приведена на рис. 1, с. Наличие указанной особенности является аналогом поведения $R-U$ -характеристики контактов при приближении к точке плавления [12,13] для нагрева постоянным током для случая протекания импульсных токов. Таким образом, анализ осциллограмм напряжения на контактах позволяет зафиксировать факт достижения температуры плавления и определить момент времени, когда это произошло.

1. Получение оценочной формулы для нахождения тока плавления

На величину тока плавления существенное влияние оказывают следующие основные параметры:

- сила контактного нажатия,
- форма контактного пятна,
- близость контактного пятна к границе контактируемых детали.

Все эти параметры могли варьироваться в широких пределах при проведении экспериментов по определению тока плавления.

Как отмечалось, сила контактного нажатия могла изменяться от 0 до 2500 N, форма КП — от круглой до нитевидной. Расстояние от КП до границы варьировалось следующим образом. В случае двух цилиндрических электродов их поверхность приближалась к пятну путем уменьшения радиуса цилиндров. При использовании плоских шин расстояние от КП до границы (нижней поверхности шины) изменялось путем изменения толщины шины, либо путем перемещения подвижного электрода

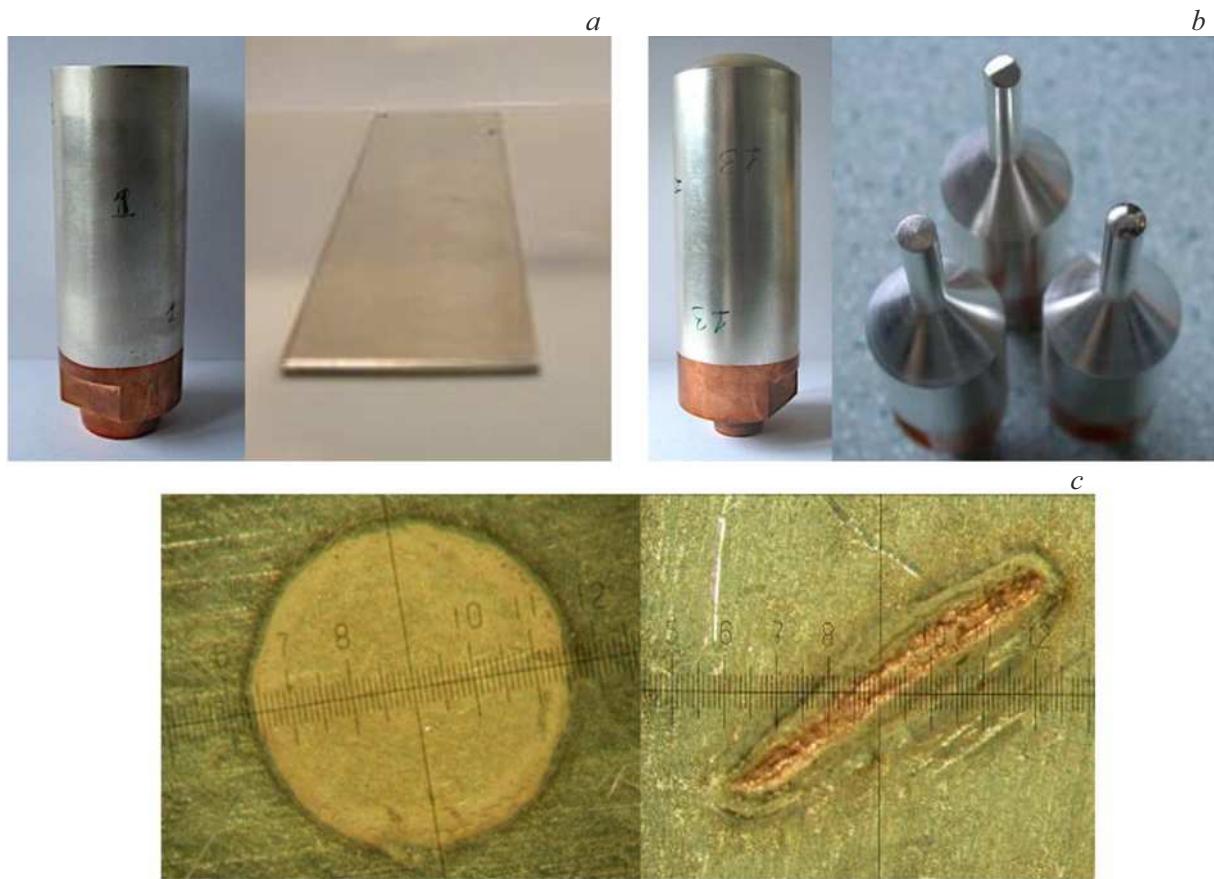


Рис. 2. Нижние неподвижные электроды (a), верхние подвижные электроды (b), микрофотографии контактных пятен (c).

вдоль оси шины к ее торцу на расстояние, сопоставимое с размером КП.

В результате проведенных измерений была накоплена большая база данных по измерению тока плавления в широком диапазоне сил контактного нажатия для контактов, различающихся по своей геометрии, форме КП и близости пятна к границам контакт-деталей. Материал, из которого были изготовлены контакты — технически чистая медь марки М1Е.

Для получения оценочной формулы для I_m запишем соотношение, связывающее в момент начала плавления $t = t_m$ значение тока, контактного напряжения и контактного сопротивления:

$$I(t_m) = \frac{U_c(t_m)}{R_c(t_m)}. \quad (1)$$

Это выражение не является стандартной записью линейного закона Ома, который связывает напряжение и ток в любой момент времени, а относится только к моменту $t = t_m$. Контактное сопротивление не постоянно, оно сложным образом зависит от распределения температуры в контактной области и размера КП, которые изменяются с течением времени.

В выражение (1) неявным образом входит большое число параметров, характеризующих конкретный тип

контактов. Чтобы выделить наиболее значимые из них, обратимся к рис. 3, где приведены зависимости величины R_c от перечисленных выше факторов для цилиндрических электродов.

На рис. 3, a представлено изменение величины R_c/R_{c0} при изменении формы КП от круга к эллипсу, λ — отношение полуосей эллипсов, R_{c0} — контактное сопротивление для случая круглого КП. На рис. 3, b приведена зависимость R_c от близости пятна к боковой поверхности цилиндрических электродов; параметр z равен расстоянию от края КП до поверхности электрода. Рис. 3, c показывает зависимость R_c от величины силы контактного нажатия для цилиндрических контактов диаметром 40 mm с формой контактирующих поверхностей „конус–плоскость“.

В первых двух случаях контактное сопротивление изменялось на десятки процентов, в то время как в третьем случае — кратно. Такие весьма грубые оценки позволяют сделать предположение о том, что наибольшее влияние на величину контактного сопротивления и, следовательно, на ток плавления оказывает сила контактного нажатия. Поэтому систематизацию экспериментальных данных мы будем проводить именно по этому параметру.

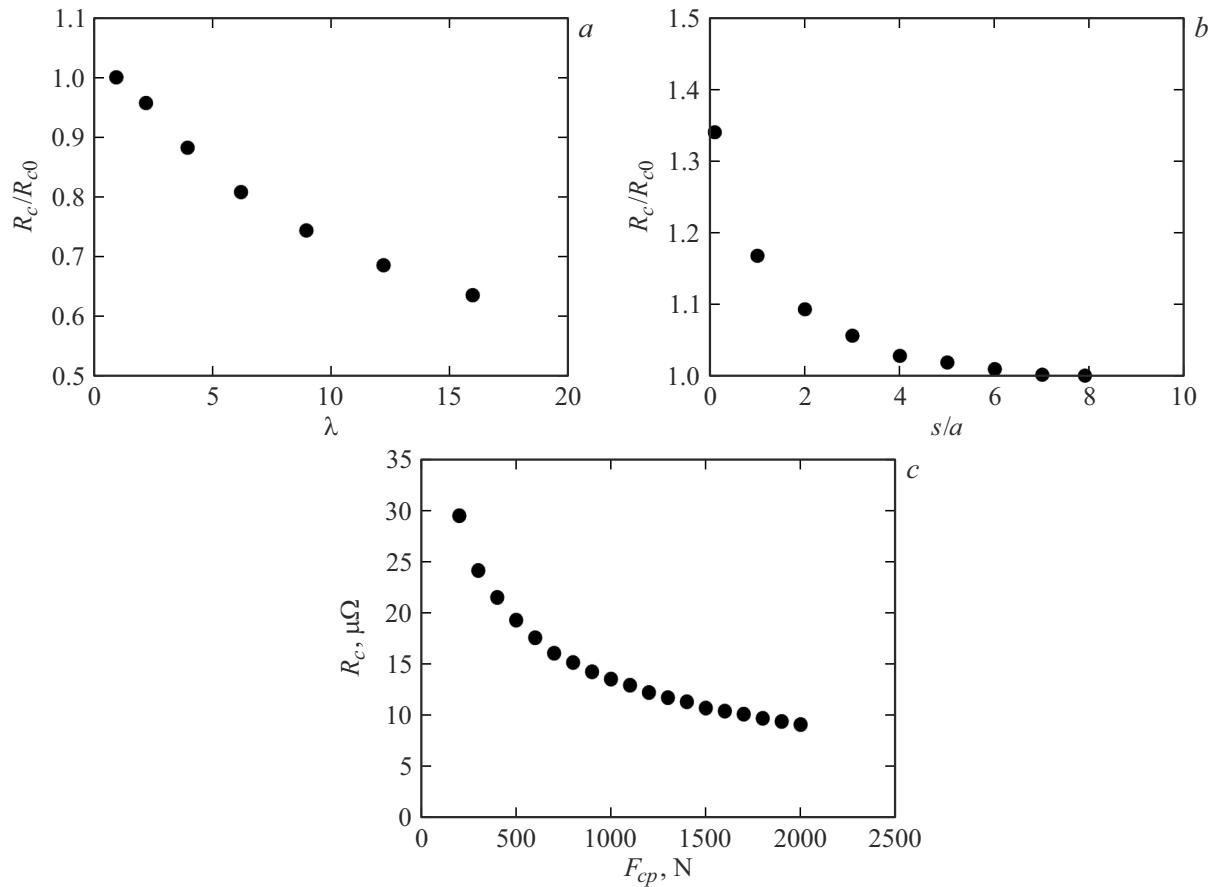


Рис. 3. Зависимость контактного сопротивления от формы контактного пятна (a), близости контактного пятна к боковой поверхности цилиндрических электродов (b), силы контактного нажатия (c).

Запишем (1) в несколько измененном виде:

$$I_m = \frac{K_U U_m^{Cu}}{K_R R_c^{cold}}. \quad (2)$$

Величина $K_U = \frac{U_c(t_m)}{U_m^{Cu}}$ представляет собой обезразмеренное напряжение плавления. Здесь величина $U_m^{Cu} = 0.43$ В — это напряжение плавления меди при стационарном нагреве [12], являющаяся характеристикой материала. Величина $K_R = \frac{R_c C(t_m)}{R_c^{cold}}$ безразмерное контактное сопротивление в момент плавления; она характеризует изменение контактного сопротивления при нагреве до плавления по сравнению с начальным значением сопротивления холодных контактов R_c^{cold} .

Приведем экспериментальные данные о величине напряжения плавления и контактном сопротивлении для электродов различной формы с разными по форме КП, группируя их только по значению силы контактного нажатия (100, 300, 1000 и 2500 Н) — рис. 4. По оси абсцисс отложен номер реализации пропускания тока, приведшего к плавлению контактов при заданной силе контактного нажатия. Момент начала плавления определялся по возникновению особенности на осциллограмме напряжения. На каждом рисунке сплошной линией отмечено среднее значение приводимых величин.

Анализируя приведенные зависимости, можно сделать следующее заключение. Для каждого значения силы контактного нажатия величина измеренных в момент начала плавления контактного напряжения и контактного сопротивления практически не зависит от геометрических факторов, характеризующих испытуемые контакты, при всем их разнообразии. Приведенные значения имеют отклонения от своего среднего в пределах 10%.

Сами средние значения монотонно возрастают при изменении силы контактного нажатия от $F_{cp}^{\min} = 100$ Н до $F_{cp}^{\max} = 2500$ Н (рис. 5).

На том же рисунке приведена зависимость от силы контактного нажатия частного двух введенных величин $K = \frac{K_U}{K_R}$. Этот коэффициент практически не зависит от приложенной силы при ее изменении в широком диапазоне — в 25 раз. Его среднее значение равно 0.65.

Учитывая это, выражение для минимального тока плавления принимает вид:

$$I_m = 0.65 \frac{U_m^{Cu}}{R_c^{cold}}. \quad (3)$$

Покажем, насколько близка оценка минимального тока плавления, полученная с помощью этого выражения,

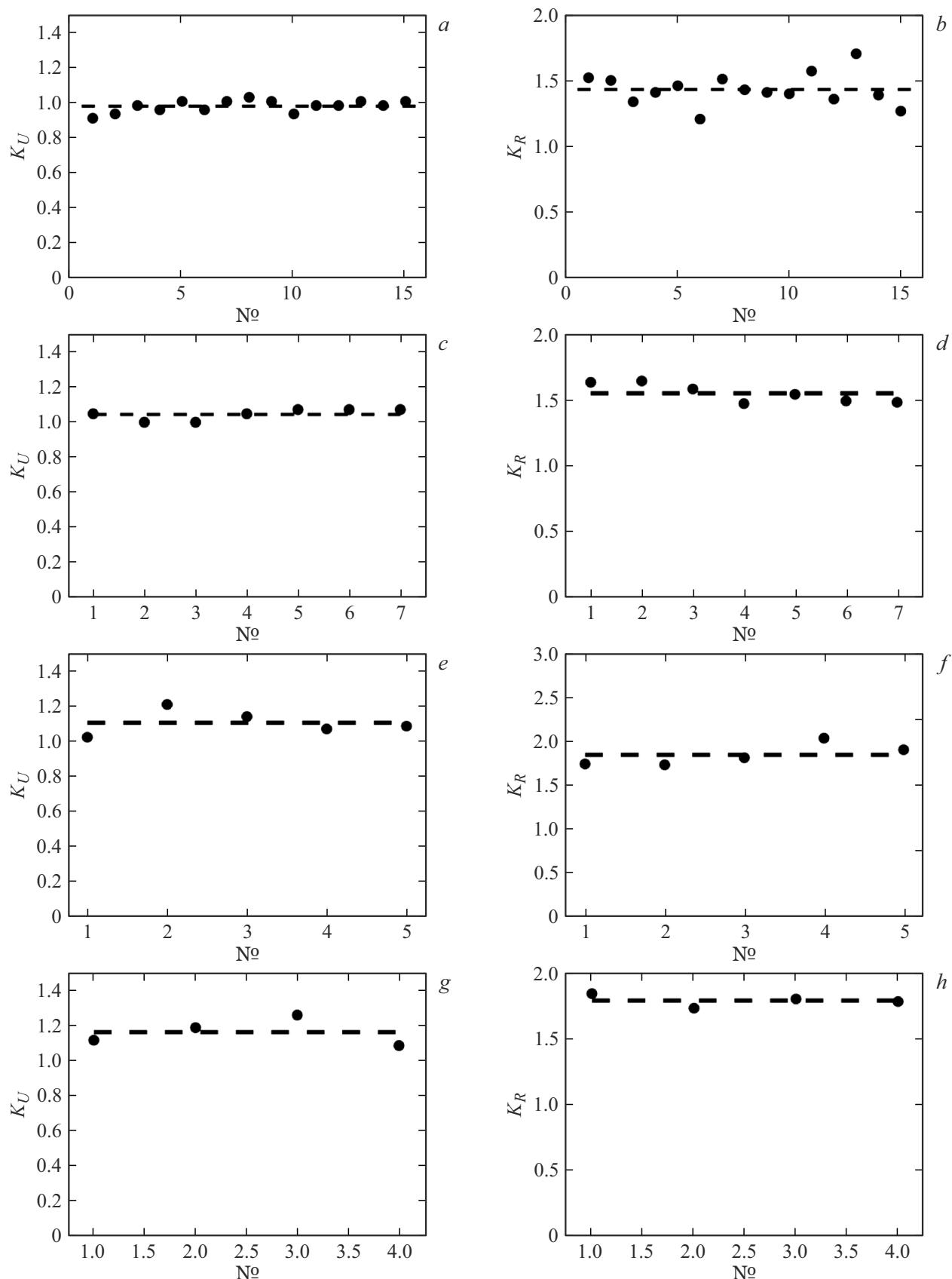


Рис. 4. Значения коэффициентов K_U и K_R при различных значениях силы контактного нажатия: *a, b* — 100; *c, d* — 300; *e, f* — 1000; *g, h* — 2500 N. № — номер реализации пропускания тока.

Сравнение тока плавления для разнотипных контактов

| Тип контактов | Тип контактных поверхностей | Форма контактного пятна | F_{cp} , N | R_c^{cold} , $\mu\Omega$ | I_m , kA |
|-----------------|-----------------------------|-------------------------|--------------|----------------------------|------------|
| Цилиндр–цилиндр | Конус–плоскость | Круглая | 500 | 18.7 | 15.4 |
| Цилиндр–шина | „Жало“–плоскость | Нитевидная | 300 | 18.8 | 15.0 |

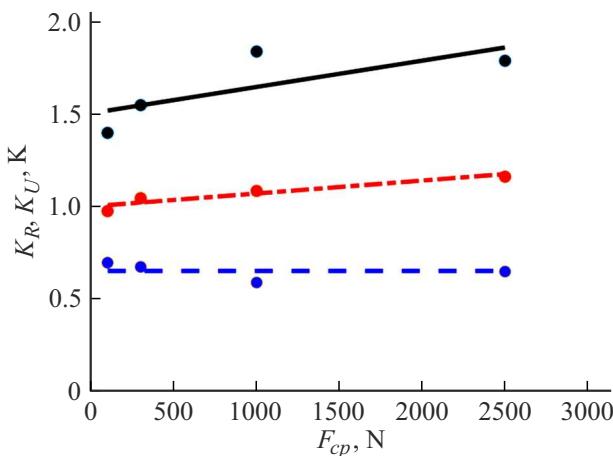


Рис. 5. Зависимости коэффициентов K_R (верхний график), K_U (средний график) и K (нижний график) от силы контактного давления.

экспериментально измеренным значениям. Такое сопоставление проведено на рис. 6. Здесь приведены данные обо всех экспериментально зафиксированных случаях

плавления при прохождении ударного тока через электрические контакты всех перечисленных типов.

Так как в (3) явным образом не входит сила контактного нажатия и геометрические характеристики электродов, то приведенная на гистограмме информация упорядочена по току плавления, а не сгруппирована по каким-то иным признакам.

Анализируя представленные на рис. 6 данные, можно заключить, что предложенная формула (3) позволяет делать оценку величины минимального тока плавления с приемлемой для решения практических задач точностью. Среднее отклонение рассчитанной величины I_m от экспериментально измеренной составляет 10 %.

Таким образом, минимальный ток плавления может быть оценен по единственной характеристике контактов — их контактному сопротивлению R_c^{cold} . Даже если электроды значительно различаются по своей геометрии, форме контактного пятна, приложенной к ним силе, но обладают близкими по величине контактными сопротивлениями, то они будут характеризоваться близкими значениями тока плавления. Проиллюстрируем это характерным примером.

Рассмотрим две пары разнотипных электродов. Первая из них (рис. 7, a) — это цилиндрические электроды

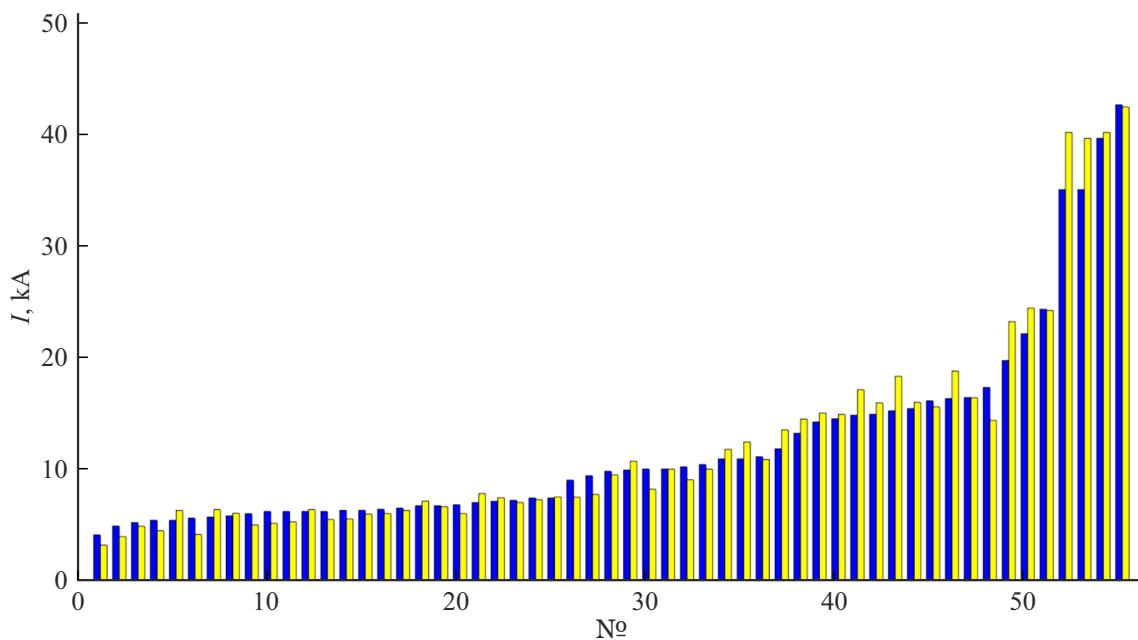


Рис. 6. Значения минимального тока плавления: темные столбцы — экспериментальные значения, светлые — вычисленные по формуле (3), № — номер реализации пропускания тока.

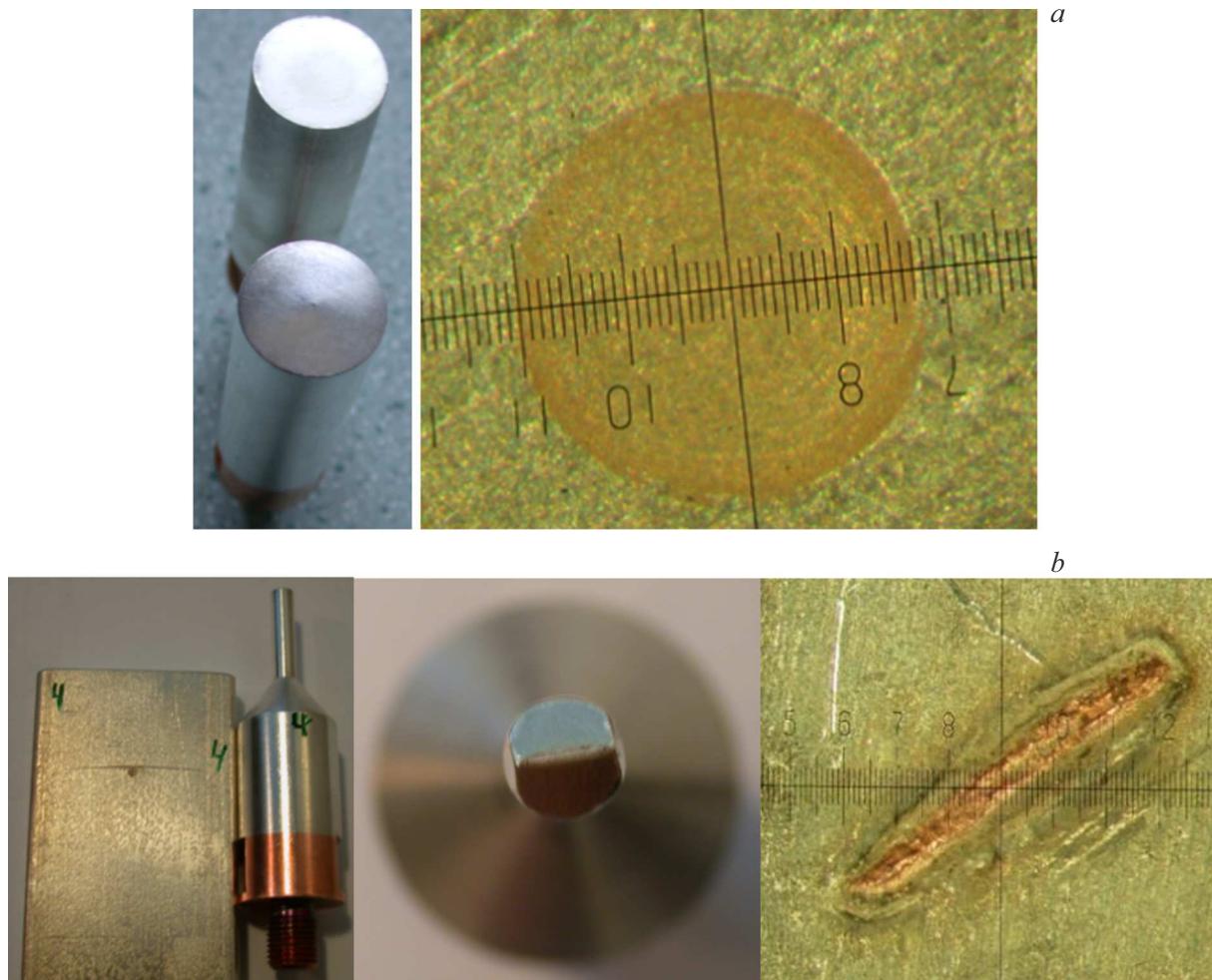


Рис. 7. Фотографии электродов и микрофотографии их контактных поверхностей.

диаметром 20 mm с типом контактной поверхности „плоскость–конус“. Контактное пятно имеет форму круга, сила контактного нажатия равна 300 N.

Вторая пара (рис. 7, *b*) образована цилиндрическим электродом диаметром 5 mm с поверхностью типа „жало“ и шиной прямоугольного сечения шириной 40 mm толщиной 10 mm. Контактное пятно имеет нитевидную форму, сила контактного нажатия значительно больше, чем в предыдущем случае — 500 N.

Значения силы контактного нажатия выбраны так, чтобы обеспечить в обоих случаях близкие значения контактных сопротивлений R_C^{cold} (см. таблицу). В результате измеренные значения минимальных токов плавления практически совпали.

Приведенный пример наглядно иллюстрирует то, что контакты, заметно различающиеся по форме и силе контактного нажатия, но имеющие близкие по величине контактные сопротивления, характеризуются близким уровнем тока плавления.

Сделаем ряд поясняющих замечаний по поводу применения выражения (3) для оценки тока плавления. Это выражение устанавливает прямую связь между искомой

величиной I_m и сопротивлением холодных контактов. Все остальные параметры, характеризующие контакты, такие как площадь и форма контактного пятна, расстояние от пятна до границы электродов, сила контактного нажатия, явно в эту формулу не входят, хотя изменение каждого из них влечет за собой соответствующее изменение тока плавления. Влияние этих параметров на ток плавления присутствует здесь опосредованно — через величину контактного сопротивления.

В этом смысле в процессе разработки контактов при стремлении выйти на определенный предельно допустимый уровень ударных токов, не приводящих к их плавлению, можно сосредоточиться только на обеспечении требуемой величины контактного сопротивления R_C^{cold} . В известной степени у разработчика остается свобода выбора конструктивных мер для достижения этой цели.

Связь (3) не дает конкретных рекомендаций по выбору формы и размеров контактов и силы контактного нажатия. Это повышает значимость исследований, направленных на определение влияния различных факторов на контактное сопротивление, в том числе путем проведения численных расчетов на модельных задачах.

Заключение

Путем обобщения экспериментальных данных по плавлению ударными токами медных сильноточных контактов различной конфигурации в широком диапазоне сил контактного нажатия было установлено, что ток плавления может быть определен по величине контактного сопротивления холодных контактов. Предложена оценочная формула для определения тока плавления. Показано, что проведенные с ее помощью расчеты с достаточной для практического использования точностью соответствуют экспериментальным данным.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] А.М. Ершов. *Релейная защита в системах электроснабжения напряжением 0,38–110 кВ* (Изд-во Инфра-инженерия, М., 2024), 609 с.
- [2] В.И. Бирюлин, Д.В. Куделина. *Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем* (Изд-во Инфра-инженерия, М., 2022), 164 с.
- [3] ГОСТ Р 52736-2007. *Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета электродинамического и термического действия тока короткого замыкания* (Введ. 2008-07-01. Стандартинформ, М., 2007), 44 с.
- [4] ГОСТ Р 52735-2007. *Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением выше 1 кВ* (Введ. 2008-07-01. Стандартинформ, М., 2008), 36 с.
- [5] О.М. Павлейно. *Физические особенности нагрева сильноточных электрических контактов* (Канд. дисс., СПб, 2015)
- [6] С.С. Горелик. *Рекристаллизация металлов и сплавов* (Изд-во МИСиС, М., 2005)
- [7] T. Israel, S. Schlegel, S. Grossmann, T. Kufner, G. Freudiger. IEEE Holm Conf. Electr. Contacts, **254** (2018). DOI: 10.1109/HOLM.2018.8611641
- [8] T. Israel, M. Gatzsche, S. Schlegel, S. Großmann, T. Kufner, G. Freudiger. IEEE Holm Conf. Electr. Contacts, **40** (2017). DOI: 10.1109/HOLM.2017.8088061
- [9] M. Gatzsche, N. Luecke, S. Großmann, T. Kufner, G. Freudiger. Transactions on CPMT, **7** (3), 317 (2017).
- [10] А.В. Хрестин, М.А. Павлейно, М.С. Сафонов. ЖТФ, **93** (1), 146 (2023). DOI: 10.21883/JTF.2023.01.54075.233-22 [A.V. Khrestin, M.A. Pavleino, M.S. Safonov. Tech. Phys., **68** (1), 137 (2023). DOI: 10.21883/TP.2023.01.55448.233-22]
- [11] М.А. Павлейно, О.М. Павлейно, М.С. Сафонов. ЖТФ, **91** (1), 110 (2021). DOI: 10.21883/JTF.2021.01.50281.148-20 [M.A. Pavleino, O.M. Pavleino, M.S. Safonov. Tech. Phys., **66** (1), 103 (2021). DOI: 10.1134/S1063784221010163]
- [12] Р. Хольм. *Электрические контакты* (ИИЛ, М., 1961) 464 с.
- [13] Н.М. Мышкин, В.В. Кончиц, М. Браунович. *Электрические контакты* (Изд-во Интеллект, М., 2008), 558 с.