

Расчет нагрева сильноточных контактов токами короткого замыкания

© Р.В. Колесник, М.А. Павлейно, М.С. Сафонов, А.В. Хрестин

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

Поступило в Редакцию 14 мая 2025 г.

В окончательной редакции 17 июля 2025 г.

Принято к публикации 4 августа 2025 г.

Проведены расчеты нагрева замкнутых контактов различными по форме токами короткого замыкания до температур, превышающих температуру рекристаллизации материала. Проанализировано влияние апериодической составляющей тока на динамику нагрева контактов. Предложены способы построения упрощенных расчетных моделей, существенно снижающих ресурсоемкость решаемых задач при сохранении приемлемой точности получающихся результатов.

Ключевые слова: электросеть, авария, короткое замыкание, контакт, нагрев.

DOI: 10.61011/JTF.2026.02.62296.118-25

Введение

При возникновении аварий в электросетях токи короткого замыкания (КЗ) протекают через токоведущие системы электрических аппаратов в течение нескольких десятков периодов до тех пор, пока не сработает система защиты, и контакты не будут разомкнуты [1,2]. Наиболее значительные перегревы конструкции происходят именно в области контактов, так как они характеризуются наличием дополнительного сопротивления по сравнению с однородными участками токоведущих систем и являются областями повышенного тепловыделения [3–5]. Поэтому нагреву контактов при авариях уделяется повышенное внимание.

Токи КЗ могут иметь различную форму. В зависимости от фазы возникновения аварии возможно присутствие в токе апериодической составляющей, наличие которой может существенно, до двух раз, увеличить его максимальное значение в первом полупериоде [6,7]. Это значение называется величиной ударного тока КЗ. Апериодическая составляющая довольно быстро, в течение нескольких периодов, затухает и ток принимает значение, равное установившемуся току КЗ $I_{\text{Short circuit}}$. Будем рассматривать нагрев контактов токами с максимальной апериодической составляющей $I_1(t)$ и без нее $I_2(t)$ (см., например, рис. 1, a, b).

В электротехнике производить количественную оценку теплового воздействия тока КЗ на проводники и токоведущие системы электрических аппаратов принято проводить с использованием интеграла Джоуля [6], который определяется как интеграл от квадрата протекающего тока в пределах от времени начала аварии ($t = 0$) до ее окончания ($t = \tau$):

$$B_\tau = \int_0^\tau I^2(t) dt.$$

Токи, протекающие в течение более длительного времени или большие по величине, характеризуются большими значениями интеграла Джоуля. Они приводят к более значительным нагревам. Это касается и теплового воздействия токами одной длительности, но разной формы, когда различие заключается в наличие или отсутствие апериодической составляющей. Например, токи, представленные на рис. 2, a, b, имеют одинаковое установившееся значение, но из-за наличия апериодической составляющей интеграл Джоуля на 10% больше для тока $I_1(t)$, чем для тока $I_2(t)$. Так что ток КЗ с апериодической составляющей приведет к несколько большему нагреву однородных проводников, чем синусоидальный. В случае контактов ситуация может оказаться иной.

1. Влияние расплывания контактного пятна на нагрев контактов токами КЗ

На нагрев контактов при протекании аварийных токов существенное влияние оказывает эффект расплывания контактного пятна (КП). Это показали как экспериментальные исследования, так и результаты компьютерного моделирования [8–11]. Остановимся на этом вопросе более подробно, проведя ряд численных расчетов.

Вычисления будем проводить для контактов, представляющих собой соосно расположенные цилиндры, изготовленные из холоднодеформированной меди марки М1, соединенные одним контактным пятном круглой формы. Это достигается выбором формы контактирующих поверхностей цилиндров. Одна из них плоская, а другая имеет форму усеченного конуса. Один цилиндр жестко закреплен, к другому приложена сила контактного нажатия 1000 N, направленная вдоль оси симметрии. При такой силе радиус КП до пропускания тока равен

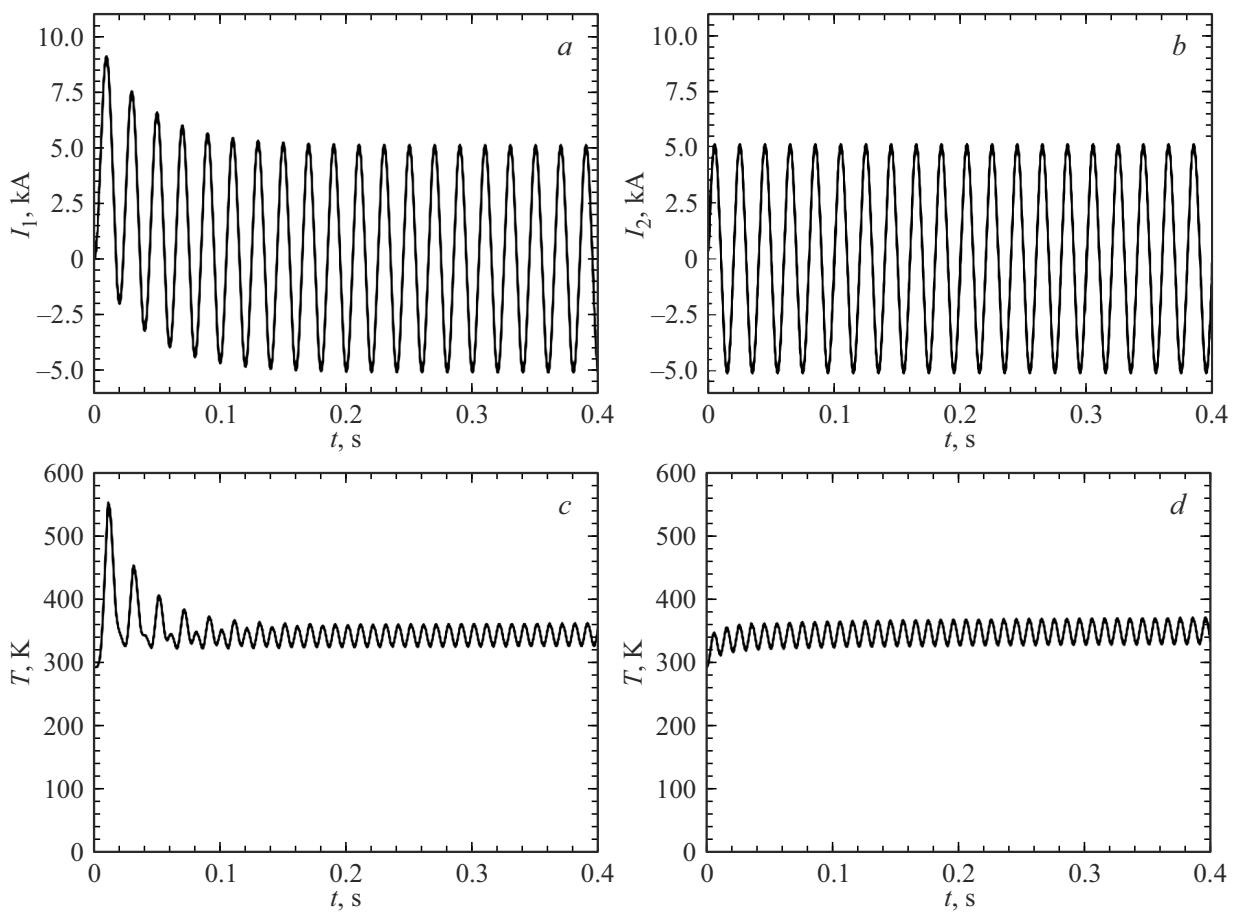


Рис. 1. Зависимость от времени токов I_1 (a) и I_2 (b) и температуры КП — (c), (d). Случай $I_{\text{Short circuit}} = 5 \text{ kA}$.

0.62 mm. Радиус цилиндров составляет 10 mm, их высота — 100 mm. Температура окружающей среды — 293 K.

Суть схемы расчетов заключается в следующем. Контакты приводятся в механическое соприкосновение путем прикладывания внешней силы. Сначала решается механическая контактная задача для определения начального размера КП. Полное время расчета протекания тока разбивается на малые интервалы dT .

На каждом временном отрезке последовательно решаются три задачи:

- токопрохождения через контакты, соединенные КП известного размера, где определяется распределение плотности тока;

- нагрева током с известным распределением его плотности (из предыдущей задачи);

- механическая контактная задача с известным распределением температуры (из предыдущей задачи) для определения изменившегося вследствие нагрева размера КП.

В [12] можно найти более подробную информацию о схеме решения и свойствах материала. Задачу в такой постановке назовем исходной, в отличие от приближенных способов решения, которые будут рассмотрены ниже.

Динамика нагрева, помимо величины и формы тока, определяется зависимостью контактного сопротивления от времени $R_c(t)$. Для массивных контактов с круглыми по форме пятнами R_c может быть определено по формуле Хольма [13]: $R_c = \rho/2a$, где ρ — удельное сопротивление материала, a — радиус КП.

Изменение величины этого сопротивления при протекании тока КЗ вызывается изменением удельного сопротивления и размера пятен в процессе нагрева. Если температура пятен меньше температуры рекристаллизации (размягчения) материала T_s , то размер пятен увеличивается незначительно. Эффект расплывания контактных пятен становится значимым при нагреве до температуры большей, чем температура рекристаллизации материала.

Рассмотрим вопрос о том, как влияет величина тока и его форма (с апериодической составляющей и без нее) на нагрев. Сравнение будем проводить по величине средней температуры КП в конце действия импульса тока КЗ. Длительность аварийного тока выберем равной 0.4 s, что соответствует 20 периодам тока промышленной частоты. За это время апериодическая составляющая при ее наличии успеет затухнуть, а среднее за период значение температуры КП практически перестает изменяться.

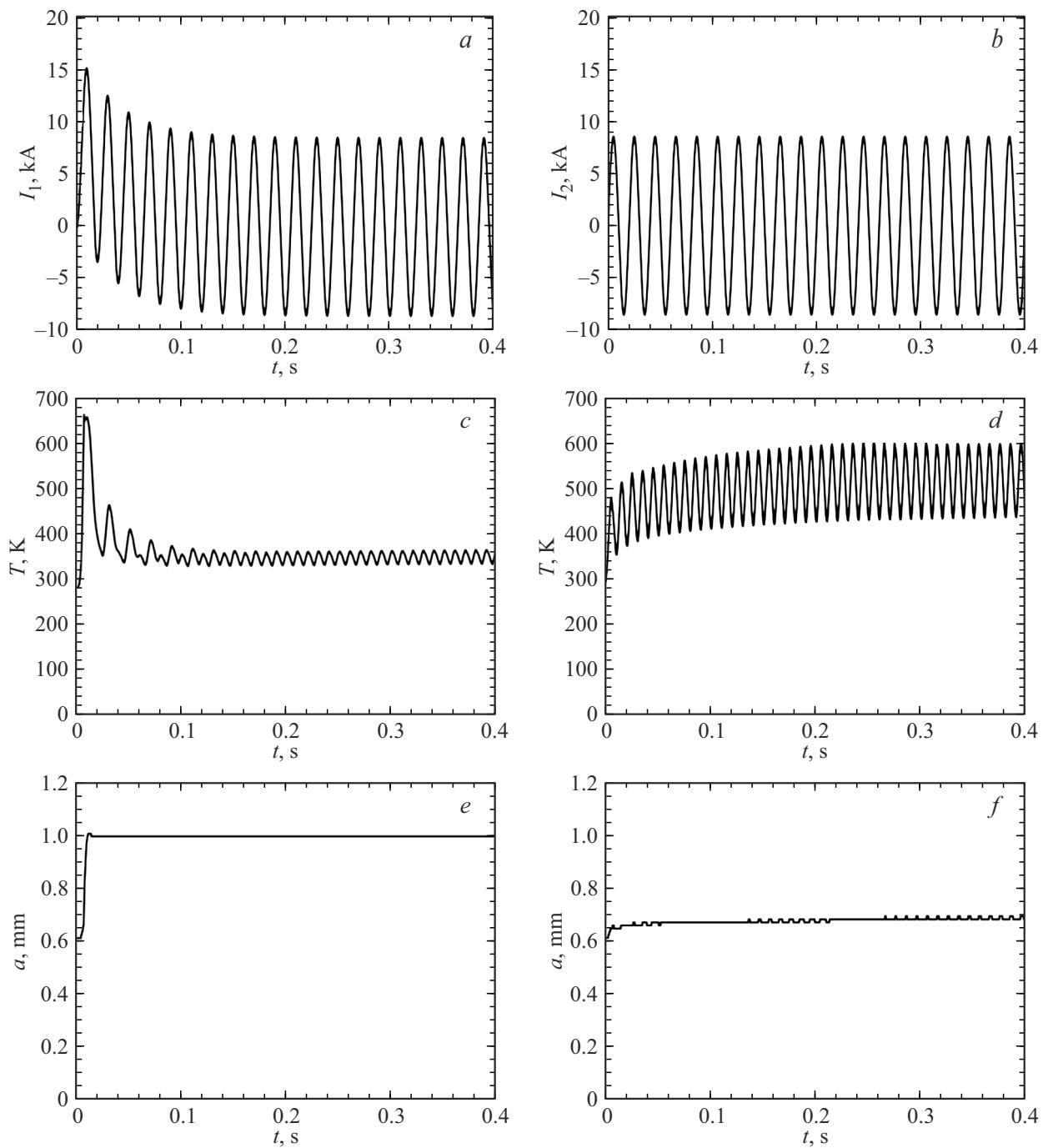


Рис. 2. Зависимость от времени токов I_1 (a) и I_2 (b), температуры КП — (c), (d) и радиуса КП (e), (f). Случай $I_{Short\ circuit} = 8.5\text{ kA}$.

Выделим три характерных случая, отличающиеся по уровню нагрева в первом полупериоде по отношению к температуре размягчения материала. В нашем случае $T_p = 600\text{ K}$. Здесь и далее под температурой КП понимаем максимальное значение температуры на поверхности пятна. Токи разной формы $I_1(t)$ и $I_2(t)$ будем группировать попарно с условием, что для каждой пары одинаковым является значение установившегося тока КЗ $I_{Short\ circuit}$. Под $I_{Short\ circuit}$ понимаем его амплитудное значение.

Первая пара токов соответствует $I_{Short\ circuit} = 5\text{ kA}$ (рис. 1, a, b). Уровень тока выбран так, чтобы T_s не достигалась даже при наличии его выброса в первом полупериоде. При этом радиус КП в обоих случаях практически не изменяется на протяжении всего времени нагрева.

Зависимость температуры КП от времени для разных по форме токов ведет себя по-разному. В первом случае наблюдается скачок температуры в первом полупериоде, затем в течение нескольких периодов наблюдается выход

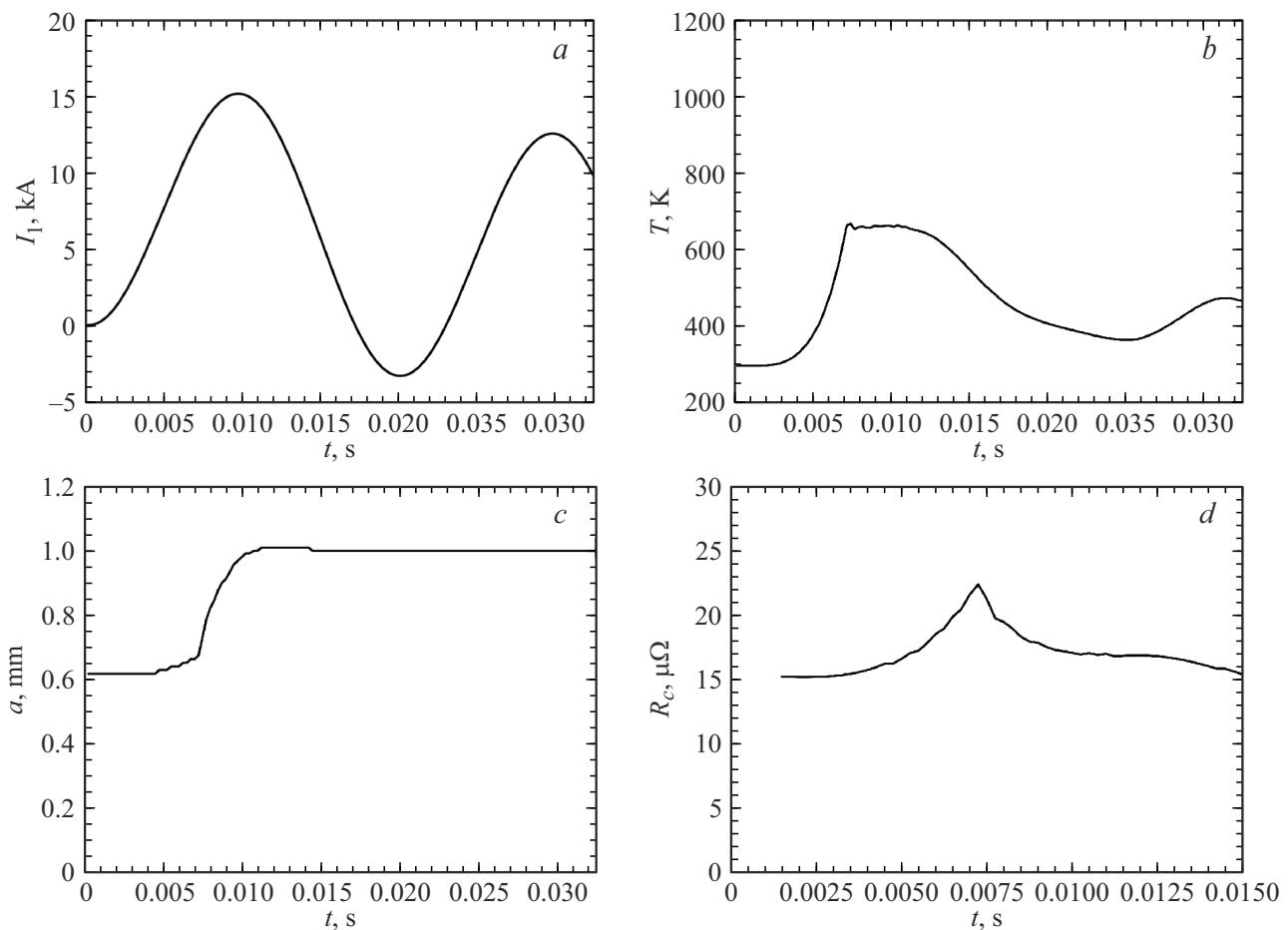


Рис. 3. Фрагменты зависимостей от времени тока I_1 (a), температуры (b), радиуса КП (c) и контактного сопротивления (d). Случай $I_{Short\ circuit} = 8.5$ кА.

на стационарное среднее значение T_{med_1} . Для тока $I_2(t)$ происходит монотонное увеличение температуры с выходом на T_{med_2} также в течение нескольких первых периодов. Значения этих температур близки — около 350 К. Превышение температуры в первом полупериоде для тока $I_1(t)$ значения T_{med_1} связано с превышением значения тока в 1.8 раз по сравнению с установившимся током $I_{Short\ circuit}$.

Следующая пара токов со значением $I_{Short\ circuit} = 8.5$ кА представляет собой пограничный случай нагрева. Ток с апериодической составляющей нагревает контактную область в первом полупериоде до температуры выше T_s , а нагрев током $I_2(t)$ в это время гораздо ниже этой температуры. Это приводит к существенному различию нагрева контактов из-за различия в размерах КП, через которые протекают эти токи (рис. 2, d, e).

Средняя температура в первом случае составляет около 350 К, во втором — более 500 К. Их конечные перегревы относительно начальной температуры в 293 К отличаются в 3.5 раза. Рассматриваемые токи термически эквивалентными считать уже нельзя, несмотря на равенство для них интегралов Джоуля.

Выясним причины такого различия в динамике нагрева. Они связаны с размягчением материала контактов в первом полупериоде прохождения тока $I_1(t)$. На рис. 3 приведены фрагменты зависимости тока, температуры и радиуса КП, а также зависимости контактного сопротивления от времени. Температура T_s достигается в момент времени $t_s = 7$ ms. Дальнейший рост температуры прекращается, несмотря на то, что ток продолжает увеличиваться (рис. 3, a, b). Это связано с началом интенсивного расплывания КП и соответствующим изменением зависимости $R_c(t)$ (рис. 3, c, d). Расплывание КП происходит за малый промежуток времени dT_s — около 2.5 ms. Далее площадь КП не уменьшается, несмотря на снижение температуры ниже уровня T_s , так как деформации контактной области, вызванные нагревом, являются пластическими, необратимыми. Подробный анализ деформации пятен при нагреве проведен в [12]. В дальнейшем при $t > T_s + dT_s$ ток $I_1(t)$ протекает при существенно меньшем значении контактного сопротивления по сравнению с током $I_2(t)$, так как в этом случае радиус КП практически не изменился. Это и вызывает столь существенную разницу в конечных температурах.

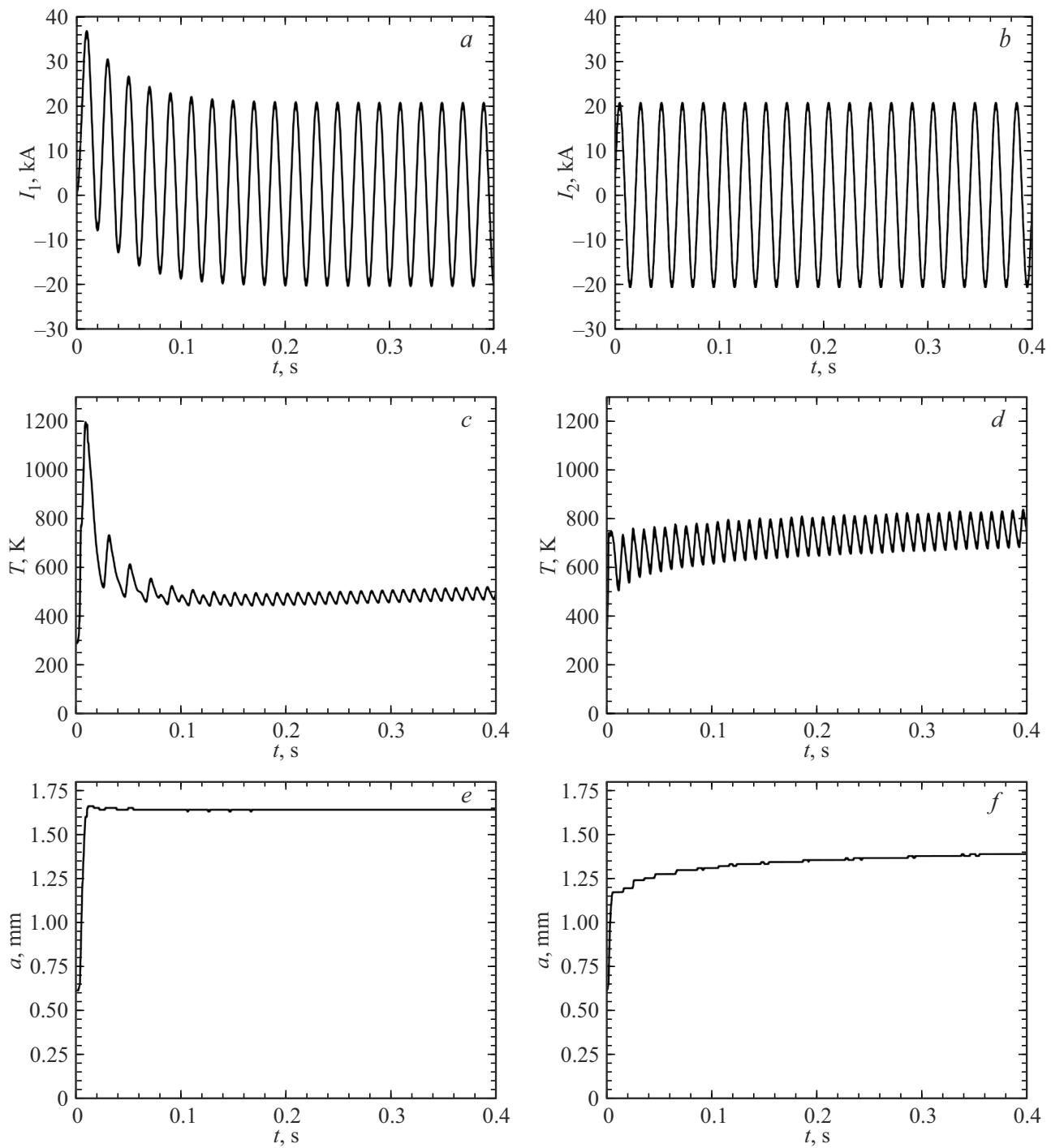


Рис. 4. Зависимость от времени токов I_1 (a) и I_2 (b), температуры КП — (c), (d) и радиуса КП (e), (f). Случай $I_{Short\ circuit} = 20.5$ кА.

Рассмотрим, наконец, вариант токовых воздействий, при которых токи $I_1(t)$ и $I_2(t)$ в первом полупериоде нагревают область контактов до температуры выше T_s (рис. 4). Из-за размягчения пятна в первом полупериоде при воздействии тока $I_2(t)$ температура растет не так интенсивно, как в предыдущем случае (рис. 2, c), но все равно разница в конечном нагреве значительная — перегревы различаются более чем в два раза (рис. 4, c, d).

Из проделанных расчетов можно заключить следующее. Апериодическая составляющая не оказывает влияния на конечный нагрев КП только в том случае, если не достигнута температура рекристаллизации. В этом случае рост контактного сопротивления обусловлен только нагревом окрестности КП.

Если эта температура превышена и происходит расплавление КП, то конечная его температура для случая

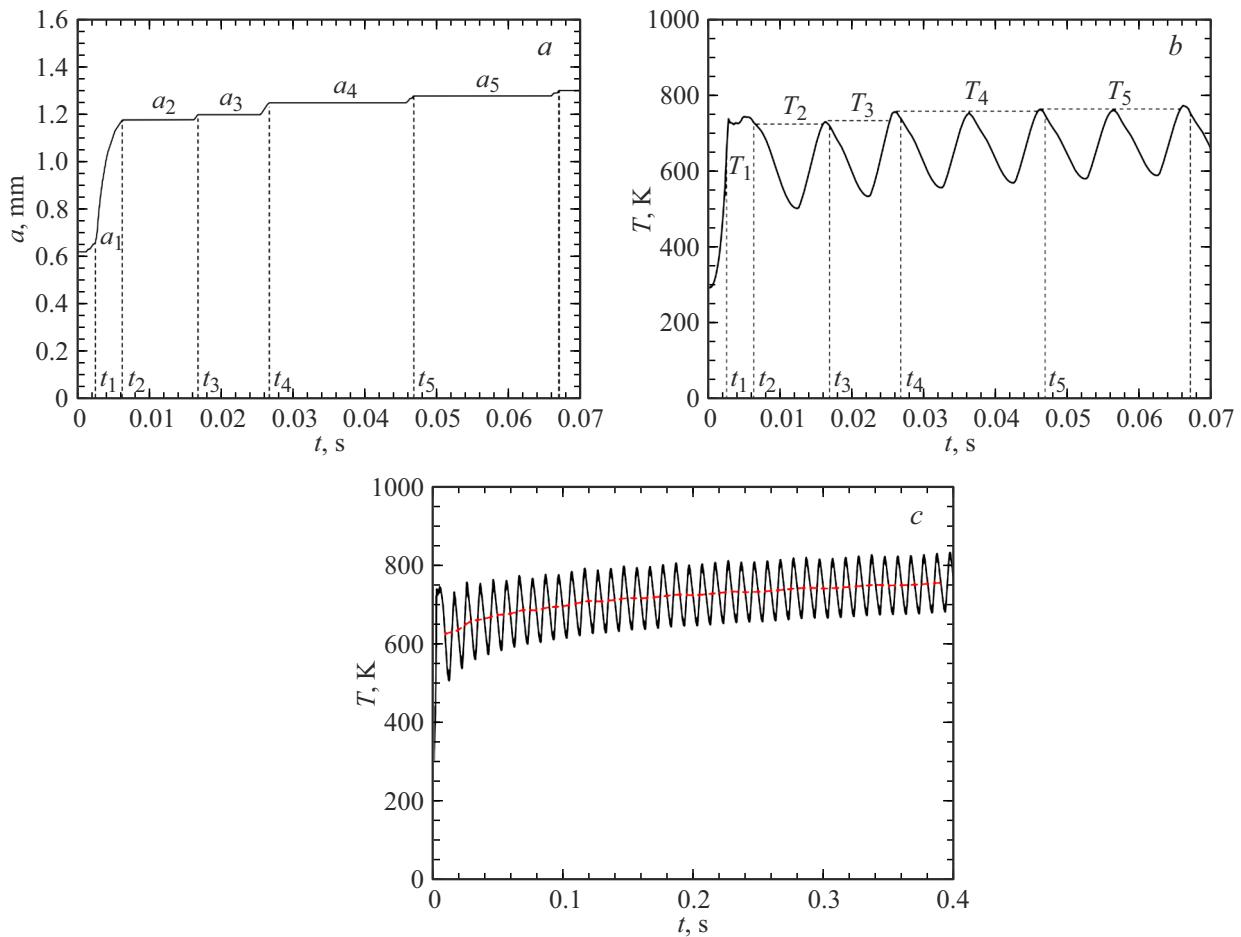


Рис. 5. Фрагменты зависимостей радиуса КП (a) и температуры (b), представленных на рис. 4, d, f. Зависимость от времени температуры КП для исходной задачи (черная кривая) и зависимость от времени среднего за период значения температуры КП для упрощенной задачи (красная кривая) (c).

нагрева синусоидальным током КЗ будет выше температуры, достигаемой при наличии в токе аperiодической составляющей. В дальнейшем при рассмотрении упрощенных моделей мы будем рассматривать нагрев контактов током без аperiодической составляющей.

2. Построение упрощенных численных моделей

Применяемая для решения исходной задачи в настоящей работе и в [12] схема расчетов нагрева замкнутых контактов токами КЗ является крайне ресурсоемкой, требующей большого расчетного времени даже для задач в осесимметричной постановке. Из трех видов решаемых подзадач — механической контактной задачи, расчета распределения плотности электрического тока и нагрева контактов известным током — первая занимает наибольшее время, более 80 %. Кроме того, знакопеременный характер тока требует разбиения всего времени решения на большое количество интервалов. Это делает актуальной разработку упрощенных числовых моделей,

которые позволяют существенно уменьшить расчетное время без заметной потери точности результатов. Особенno это касается решения трехмерных задач, а все реальные контакты являются трехмерными объектами, не описываемыми двумерными упрощениями. Ниже рассмотрены два метода, существенно сокращающие расчетное время по сравнению с исходной задачей. Один из них основан на уменьшении числа решаемых механических контактных подзадач путем использования приближенного способа описания зависимости радиуса КП от времени. В основе второго метода лежит замена знакопеременного токового воздействия на более простое по форме, требующее значительно меньшего числа разбиений полного расчетного времени на малые интервалы.

Поясним суть первого метода. Проследим более детально за процессом увеличения радиуса КП. На временном интервале от $t = 0$ до t_1 радиус монотонно возрастает от начального значения до a_1 за счет нагрева контактной области от начальной температуры до температуры рекристаллизации $T_1 = T_s$ (в нашем случае —

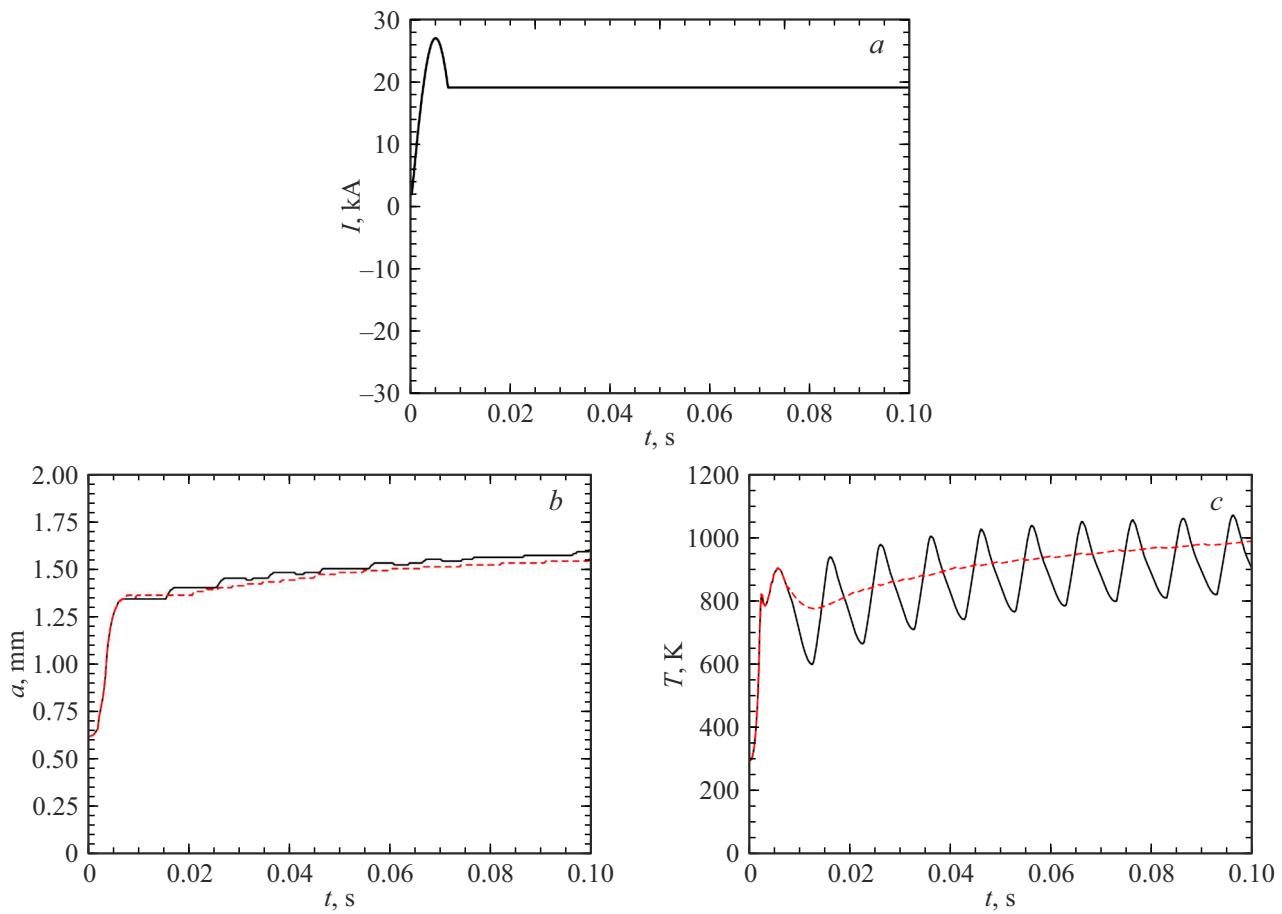


Рис. 6. Упрощенный по форме ток (a), изменение радиуса во времени (b) и сравнение нагрева (c) для исходной задачи (черные кривые) и упрощенной задачи (красные кривые).

600 К). Далее следует интенсивное расплывание пятна, вызванное размягчением материала. Радиус КП к моменту t_2 возрастает на 80 %.

Затем наблюдается ступенчатый рост радиуса. На каждом k -м временном интервале радиус величиной a_k сохраняется до тех пор, пока текущее значение температуры не превысит величину T_k . Таким образом, на этом интервале времени нет необходимости в решении наиболее ресурсоемкой механической контактной задачи. Новое значение радиуса a_{k+1} нужно будет определить только в то время, когда выполнится условие $T > T_k$.

В проделанных расчетах один период тока разбивался на 100 интервалов, на каждом из которых решалась в том числе ресурсоемкая механическая контактная задача. Вместо этого можно решить ее только в моменты t_3 , t_4 , t_5 и т. д. и не решать в промежутках между ними. Это сокращает число решаемых задач механики приблизительно в 200 раз. На начальном интервале от $t = 0$ до t_2 решается исходная задача без упрощений.

Сравним результаты расчета задачи в исходной постановке и в рассмотренном приближенном варианте (рис. 5, c). Разность средней по периоду температуры

к концу нагрева не превышает 5 %. Это показывает высокую эффективность данного приближенного метода.

Перейдем к рассмотрению второй упрощенной модели. В первом случае мы приближенно описывали изменение радиуса КП от времени после завершения процесса его размягчения, оставляя ток знакопеременным, как в исходной не упрощенной задаче. В данной постановке контактная задача для нахождения радиуса КП решается на каждом временном интервале dT , а форма тока упрощается — большую часть времени синусоидальный ток заменяется действующим значением. Такая замена осуществляется после того, как в области КП была достигнута температура рекристаллизации, и произошло его размягчение. Замена знакопеременного тока его действующим значением позволяет существенно увеличить расчетный шаг по времени без заметной потери точности получающихся результатов.

Рассмотрим результаты расчетов с применением данного приближения для случая достижения T_s на первом полупериоде. Ниже приведена форма тока: переменный ток заменяется своим действующим значением после первого максимума (рис. 6, a). Замена происходит так, чтобы не было скачка тока.

До тех пор, пока замена тока не произошла, решается исходная задача. Поэтому получающиеся зависимости температуры и радиуса КП от времени не отличаются от исходных. Далее контакты нагреваются в условиях протекания постоянного тока. Температура монотонно возрастает, но несколько быстрее, чем средняя температура в исходной задаче. Это происходит из-за того, что для знакопеременного тока температура в максимумах превосходит температуру в КП при нагреве действующим значением тока приблизительно на 100 К, поэтому расплывание КП происходит несколько интенсивнее. Знакопеременный ток протекает через контакты при меньшем значении R_c , поэтому значение средней температуры контактов будет несколько ниже, чем при протекании тока с действующим значением.

В рассматриваемом примере после протекания 40 периодов тока разность между температурой, полученной в расчете по второй приближенной схеме, и средней по периоду температурой в исходной задаче составляет 50 К на фоне нагрева до 1000 К, что вполне приемлемо для проведения практических оценок нагрева. Отметим, что такое упрощение эффективно тогда, когда размягчение КП происходит на одном из первых периодов.

Заключение

Предложенные приближенные методы расчета нагрева контактов токами КЗ показывают хорошее соответствие их результатов результатам, полученными при решении исходной термо-электро-механической контактной задачи. При этом расчетное время существенно сокращается как за счет уменьшения числа решаемых механических контактных задач, из которых определяется текущее значение радиуса КП, так и за счет упрощения формы токовых воздействий. Такие схемы решения могут быть рекомендованы для проведения достоверных оценок нагрева контактов.

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* (Инфра-инженерия, Вологда, 2024)
- [2] В.И. Бирюлин, Д.В. Куделина. *Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем* (Инфра-инженерия, Вологда, 2022)
- [3] Н.М. Мышкин, В.В. Кончиц, М. Браунович. *Электрические контакты* (Интеллект, Московская обл., 2008)
- [4] Е.Г. Порсев, Б.В. Малоземов. *Электрические и электронные аппараты* (НГТУ, Новосибирск, 2021)
- [5] В.Д. Червенчук, А.Л. Иванов. *Электрические аппараты. Тепловые процессы в электрических аппаратах* (СибАДИ, Омск, 2016)
- [6] ГОСТ Р 52736–2007. Методы расчета электродинамического и термического действия тока короткого замыкания. Введ. 2008–07–01. (Стандартинформ, М., 2007)
- [7] 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)
- [8] T. Israel, S. Schlegel, S. Grossmann, T. Kufner, G. Freudiger. IEEE Holm Conf. Electr. Contacts, **254** (2018). DOI: 10.1109/HOLM.2018.8611641
- [9] 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
- [10] M. Gatzsche, N. Luecke, S. Grossmann, T. Kufner, G. Freudiger. Transactions on CPMT, **7** (3), 317 (2017).
- [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] 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]
- [13] Р. Хольм. *Электрические контакты* (ИИЛ, М., 1961)