

Бегаль Дмитрий Игоревич

Begal' Dmitriy Igorevitch

Магистрант

Master's Degree Student

Павлейно Михаил Анатольевич

Pavleyno Mikhail Anatolievich

Доцент, кандидат физико-математических наук

Ph. D., associate professor

Павлейно Ольга Михайловна

Pavleyno Olga Mikhailovna

Старший преподаватель, кандидат технических наук

Senior lecturer, Ph. D. in technical sciences

Сафонов Максим Сергеевич

Safonov Maksim Sergeevich

Ведущий инженер

Lead engineer

Санкт-Петербургский Государственный Университет

Saint-Petersburg State University

О ВЛИЯНИИ НЕСИММЕТРИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ НА ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИХ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ СТАЦИОНАРНОМ НАГРЕВЕ

ON THE EFFECT OF ASYMMETRIC ELECTRICAL CONTACTS ON THE ACCURACY OF DETERMINING THEIR TEMPERATURE FOR STATIONARY HEATING

Аннотация на русском языке: В статье рассматривается вопрос влияния геометрической несимметрии электрических контактов и несимметрии нагрузок на точность определения температуры площадок касания по методу Хольма-Кольрауша. Обозначены границы применимости метода для контактов типа «цилиндр-цилиндр».

Summary in English: In this paper, influence of geometric asymmetry of electrical contacts and thermal loads asymmetry on precision of contact spot temperatures calculation by Holm-Kohlraush relation (also known as voltage-temperature relation) is considered. Limits of applicability for this relation were defined for “cylinder-cylinder” type of electrical contacts.

Ключевые слова: электрические контакты, метод Хольма-Кольрауша.

Keywords: electrical contacts, Holm-Kohlraush method, voltage-temperature relation.

Введение

Электрические контакты входят в состав практически каждой цепи, выполняя функцию ее коммутации. Они представляют собой физически различные проводники, которые способны проводить ток при их замыкании путем приложения внешних сил. Электрических ток проходит не через всю

поверхность соприкосновения, а лишь через небольшие по размеру контактные пятна, конфигурация которых зависит от формы и материала контактов, структуры их поверхности, величины внешней силы [1].

Величина плотности тока в окрестности контактных пятен гораздо выше, чем вдали от них. Это приводит к тому, что контакты характеризуются наличием дополнительного сопротивления по сравнению с однородными участками электрической цепи, называемого контактным сопротивлением. Вследствие этого области непосредственного контактирования являются, как правило, наиболее нагретыми участками цепи. Это может вызвать их перегрев свыше предельно допустимых значений, что отрицательно сказывается на работоспособности контактов и электрической цепи в целом.

Особенно остро проблема возможного перегрева проявляется для сильноточных контактов, входящих, например, в состав высоковольтных электрических аппаратов при протекании аварийных токов короткого замыкания [2]. В этом случае возможно сваривание контактов, приводящее к потере способности коммутировать протекающие токи.

Определение температуры контактов является непростой задачей. Прямое ее измерение в окрестности контактных пятен невозможно. Наиболее распространенным косвенным способом оценки температуры контактных площадок является метод Хольма-Кольрауша [3-6], основанный на взаимосвязи параметров температурного и электрического полей.

В [3, 4] рассмотрены симметричные контакты, соединенные одним контактным пятном – рис.1.

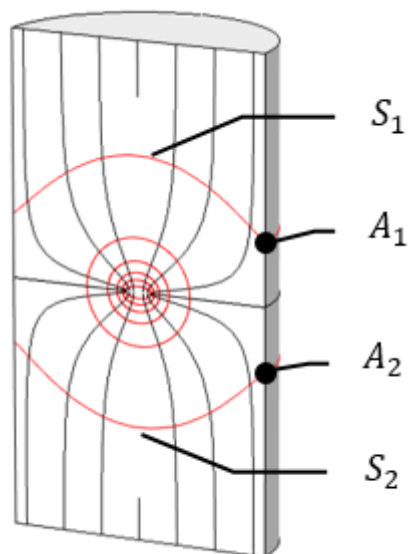


Рисунок 1. Схематичное изображение области стягивания.

Если предположить, что боковая поверхность адиабатична, то линии электрического поля и линии потока тепла совпадают, а любая эквипотенциальная поверхность является также изотермической.

Используя метод термоэлектрических аналогий, показано, что температуру контактного пятна T_0 можно связать с температурой T_θ двух изотермических поверхностей S_1 и S_2 и разностью потенциалов между ними U_c (формула Хольма-Кольрауша):

$$L(T_\theta^2 - T_0^2) = \frac{U_c^2}{4}, \quad (1)$$

где L – параметр Лоренца. При выводе (1) предполагается, что для материала контактов справедлив закон Видемана-Франца-Лоренца:

$$\rho\kappa = LT, \quad (2)$$

ρ – удельное сопротивление материала, κ – теплопроводность материала.

Выражение (1) позволяет получить значение температуры контактного пятна путем измерения температуры в одной из точек A_1 или A_2 на поверхности контактов и разности потенциалов между ними.

В случае реальных контактов и режимов прохождения тока через них условия, при которых получено (1), может быть нарушено. При этом данный способ определения температуры контактных пятен становится приближенным. Выделим три фактора, влияющих на точность метода Хольма-Кольрауша.

Во-первых, всегда существует теплообмен контактов с окружающей средой. Выделяющееся в контактной окрестности тепло отводится не только вдоль проводников за счет теплопроводности, но и с их поверхности за счет механизмов конвекции и излучения. Наличие присоединенной массы также способствует отводу тепла с поверхности проводника [8].

Во-вторых, реальные контакты в большинстве случаев геометрически несимметричны или несимметричным образом нагружены со стороны примыкающих к ним частей токоведущей системы.

В-третьих, протекающие через них токи могут быть нестационарны. Например, при коммутации нагрузок в электрических сетях или в результате возникновения коротких замыканий.

Ниже будет рассмотрено влияние несимметрии контактов и нагрузок на точность определения температуры по методу Хольма-Кольрауша. Соответствующие численные расчеты будут проведены в ANSYS. В качестве модели контактов выбраны два соосных медных цилиндра радиуса R и высотой h , соединенные одним круглым контактным пятном, радиус которого обозначим a .

Процесс нагрева электродов описывается следующей системой уравнений:

$$\gamma c_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla(\kappa \nabla T) = \rho j^2 \quad (3)$$

$$\nabla\left(\frac{1}{\rho} \nabla \varphi\right) = 0 \quad (4)$$

$$\vec{E} = -\nabla\varphi \quad (5)$$

$$\vec{j} = \frac{1}{\rho} \vec{E} \quad (6)$$

где T – температура, j – плотность электрического тока, φ – электрический потенциал, E – напряженность электрического поля. При решении задачи учитываются зависимости удельного сопротивления, теплопроводности, теплоемкости c_p и плотности γ от температуры. На боковой поверхности электродов задается величина коэффициента конвекции k . При нагреве стационарным током первое слагаемое в (3) равно нулю.

Влияние теплообмена с окружающей средой на точность определения температуры контактного пятна по методу Хольма-Кольрауша

При сделанных предположениях выбор поверхностей S_1 и S_2 и, следовательно, точек измерения A_1 и A_2 произволен. Отходя от приближения об отсутствии теплообмена с окружающей средой, заметим, что линии тока и теплового потока, а также изотермические и эквипотенциальные поверхности перестают совпадать.

Это различие тем больше, чем интенсивнее теплообмен. Тем не менее, при выборе точек A_1 и A_2 на определенном расстоянии друг от друга можно получить приемлемое по точности значение температуры контактных площадок даже при больших k . Выбирая значение k равным 10, 100, 1000 10000 Вт/м²К, мы, соответственно, можем моделировать различные способы охлаждения электродов: естественная воздушная конвекция, вынужденная воздушная конвекция, жидкостное охлаждение, испарительное жидкостное охлаждение [7].

Расположим точки A_1 и A_2 на поверхности проводника, симметрично относительно контактного пятна на расстоянии $S_{\phi,T}$ от его центра. Рассчитаем перегрев контактного пятна по методу Хольма-Кольрауша θ_{x-k} и сравним с

перегревом θ_m , полученным в моделировании. На рисунке 2 представлена зависимость отклонения этих перегревов $(\theta_{x-k} - \theta_m)/\theta_m$ от $S_{\phi, T}$ при различных коэффициентах конвекции. Оно составило единицы процентов в случае естественного и вынужденного воздушного охлаждения при выборе точки измерения температуры и потенциала на расстоянии менее $100a$, но для больших значений k отклонение существеннее.

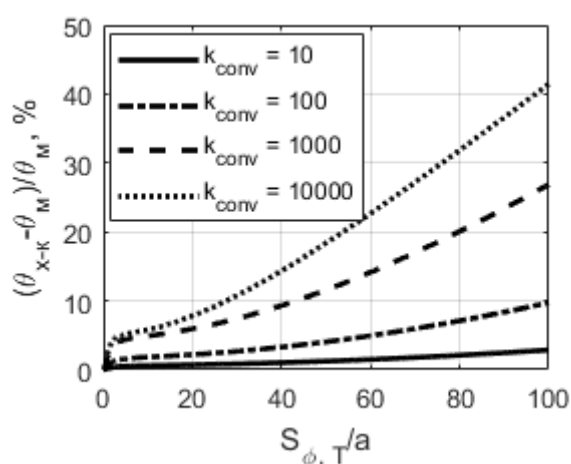


Рисунок 2. Зависимость отклонения перегрева, рассчитанного по соотношению Хольма-Кольрауша, от полученного в модели от расположения A_1 и A_2

Влияние геометрической несимметрии контактов на точность определения температуры контактного пятна по методу Хольма-Кольрауша

Соотношение Хольма-Кольрауша выведено в предположении о симметричных контактах. В реальности часто это не выполняется. При геометрической асимметрии контакт меньшего размера нагревается сильнее. Рассмотрим контакт двух цилиндров радиусов R и $R + \Delta R$. Возникает тепловой поток от более нагретого контакта к менее нагретому, идущий через контактное пятно. В результате, максимум температуры сдвигается от контактного пятна внутрь более нагретого контакта на расстояние меньшее, чем размер контактного пятна, либо вовсе уходит на удаленный конец проводника (рис. 3а). Первый случай достаточно близок к симметричному, что

позволяет использовать соотношение Хольма-Кольрауша (рис. 3б). В последнем случае измерение температуры методом Хольма-Кольрауша не представляется возможным поскольку максимум, по сути, отсутствует в окрестности контактного пятна.

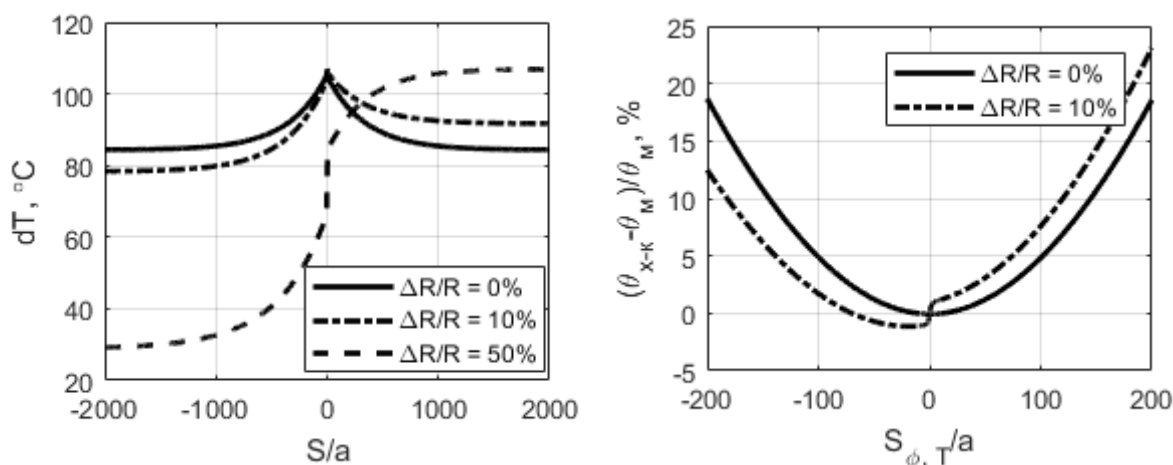


Рисунок 3. а) Характерные распределения температуры при асимметрии; б) зависимость отклонения перегрева, рассчитанного по соотношению Хольма-Кольрауша, от полученного в модели от расположения A_1 и A_2

Влияние несимметрии тепловых нагрузок на точность определения температуры контактного пятна по методу Хольма-Кольрауша

Тепловой поток, проходящий через контактное пятно, может возникать не только из-за геометрической асимметрии. Разные по величине тепловые нагрузки контактах также приводят к такому эффекту. Рассмотрим цепочку цилиндрических проводников, соединенных одинаковыми контактными пятнами. Изменяя радиус одного из пятен смоделируем асимметрию тепловых нагрузок. В таком случае ситуация в окрестности контактного пятна качественно повторяет то, что происходит и при геометрической асимметрии: максимум температуры сдвигается из контактного пятна в сторону более нагретого контакта.

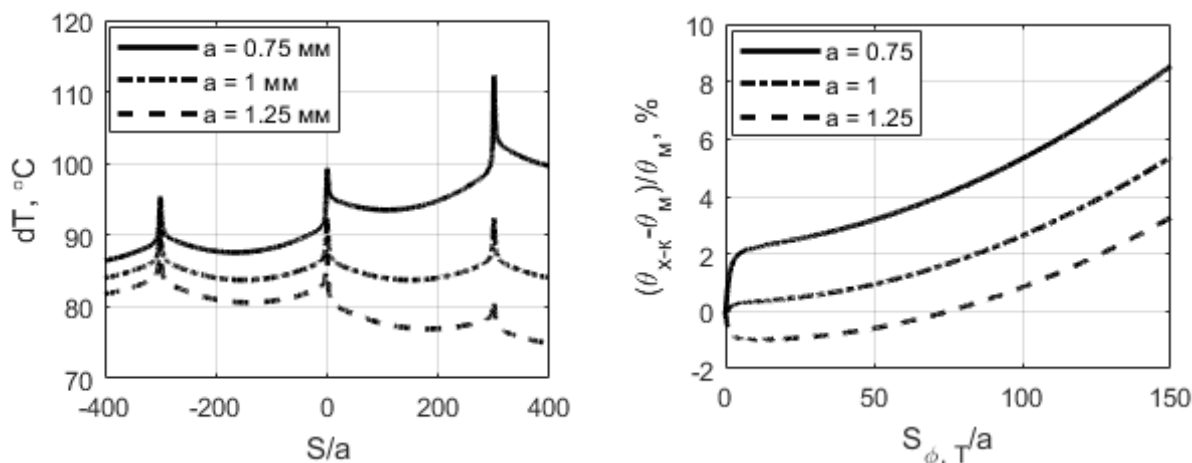


Рисунок 5. а) Характерные распределения температуры при тепловой асимметрии; б) зависимость отклонения перегрева, рассчитанного по соотношению Хольма-Кольрауша, от полученного в модели от расположения A_1 и A_2 (центральное контактное пятно).

При такой асимметрии в распределении температур результат определения температуры КП получается достаточно точным – отклонение составляет менее 10%.

Выводы

Для цилиндрических торцевых контактов Метод Хольма-Кольрауша позволяет с точностью до единиц процентов определять температуру контактных пятен при охлаждении с помощью естественной и вынужденной воздушной конвекции. Точки измерения температуры и потенциала должны находиться на расстоянии не более 100 радиусов контактного пятна от площадки касания. При более интенсивном охлаждении контактов ошибка в определении температуры может оказаться неприемлемо большой.

Для несимметричных контактов или несимметричных тепловых нагрузок точность определения температуры контактных пятен по методу Хольма-Кольрауша снижается. Однако для рассмотренных в работе случаев несимметрии ошибка не превышает 10%.

Литература:

1. ГОСТ 14312-79 Контакты электрические. Термины и определения.
2. ГОСТ 8024-90 Аппараты и электротехнические устройства переменного тока на напряжение свыше 1000 В. Норма нагрева при продолжительном режиме работы и методы испытаний. – М.: Издательство стандартов, 1990. – 19 с.
3. Хольм, Р. Электрические контакты. – М.:Иностр.литература, 1961. – 464 с.
4. Slade, P.G., Electrical contacts: principles and applications. – N.Y.: CRC Press, 2014.
5. Электрические и электронные аппараты. В 2 т. Т. 1. Электромеханические аппараты: учебник для студ. высш. учеб. заведений / Е. Г. Акимов и др.; под ред. А.Г.Годжелло, Ю.К.Розанова. — М. : Издательский центр «Академия», 2010. — 352 с.
6. Афанасьев, В.В. Справочник по расчету и конструированию контактных частей силовых электрических аппаратов. – Л.:Энергоатомиздат, 1988. – 384 с.
7. Беляев, В. Л. Особенности работы и конструкций многоамперных электрических аппаратов: Учебное пособие / В. Л. Беляев – СПб. : Северо-Западный государственный заочный технический университет, 2005.
8. Павлейно О.М., Сафонов М.С., Статуя А.А. О влиянии присоединенной массы на точность определения температуры электрических контактов // Синергия наук. 2017. № 15. – С. 588-597. – URL: <http://synergy-journal.ru/archive/article0963>