

Павлейно Ольга Михайловна

Pavleyno Olga Mikhailovna

старший преподаватель

senior lecturer

Сафонов Максим Сергеевич

Safonov Maksim Sergeevich

ведущий инженер

lead engineer

Статуя Алексей Александрович

Statuya Alexey Alexandrovich

старший преподаватель

senior lecturer

Санкт-Петербургский Государственный Университет

Saint-Petersburg State University

О ВЛИЯНИИ ПРИСОЕДИНЕННОЙ МАССЫ НА ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ ON THE EFFECT OF THE SUPPLEMENTARY MASS ON THE ACCURACY OF DETERMINING THE TEMPERATURE OF ELECTRICAL CONTACTS

Аннотация на русском языке: В статье приводится расчёт температуры различных контактных соединений токоведущих шин при помощи метода конечных элементов. Производится сравнение полученных значений температуры контакта с результатами расчетов по формуле Хольма-Кольрауша. Делается вывод о возможности применения формулы Хольма-Кольрауша для определения температуры контакта.

Summary in English: The article provides the calculation of the temperature of various contact connections of busbars by the finite element method. A comparison of the obtained values of the temperature of the contact with the results of calculations using the Holm-Kalrausch formula is made. It is concluded that the Holm-Kohlrausch formula can be used to determine the contact temperature.

Ключевые слова: электрические контакты, токоведущие шины, метод Хольма-Кольрауша

Keywords: electrical contacts, busbars, Holm-Kolrausch method

Введение.

Контактом электрической цепи принято [1] называть часть электрической цепи, предназначенную для коммутации и проведения электрического тока при заданном действии устройства. В местах контакта вследствие повышенного электрического сопротивления выделяется большое количество теплоты, в некоторых случаях приводящее к перегревам и расплавлением металла соприкасающихся поверхностей. Причинами многих



аварий на силовых подстанциях были неудовлетворительные состояния контактных соединений, в том числе и на шинах, а также подвижных частей и гибких связей разъединителей. Измерение температуры и контроль нагрева контактных соединений обязательны при прохождении максимальных токов нагрузки. При проектировании электротехнических аппаратов необходимо иметь возможность расчета нагрева контактных соединений при различных токах.

Практически все имеющиеся в настоящее время в литературе [2; 3; 4] методы теоретических оценок температуры электрических контактов по измеренным величинам нагрева поверхности контактов и контактного напряжения, справедливые для стационарного и квазистационарного нагрева имеют ряд существенных ограничений, которые будут рассмотрены ниже.

Наиболее распространённым методом определения температуры контактного пятна является метод Хольма-Кольрауша, связывающий температуру контакта и разность потенциалов на контакте.

$$T_k^2 - T_0^2 = \frac{U_c^2}{\gamma}$$

При этом существенным является допущение об эквивалентности изотерм и эквипотенциалей электрического и теплового полей контактной системы. Реальные контактные системы имеют ряд существенных отличий от идеализированных моделей, в их числе можно отметить:

- Внешняя поверхность контактной системы не теплоизолирована, происходит интенсивный теплообмен с окружающей средой за счет конвекции и излучения,
- Реальные контакты практически всегда несимметричны, обычно встречается не симметрия двух видов: несимметричная геометрия и несимметричные нагрузки (даже для симметричных контактов),
- В большинстве случаев имеет место наличие «присоединенной массы» даже для торцевых контактов.

Остановимся на последнем пункте подробнее. Как известно [1], в зависимости от конструкции, назначения, способа соединения материалов, области применения и других факторов различают контактные соединения: болтовые, сварные, паяные и выполненные обжатием (опрессованные и скрученные). В любом из этих случаев в области контакта присутствует т.н. «присоединенная масса», под которой мы будем понимать, как массу дополнительных материалов, используемых для контактного соединения (болтов, припоя, крепежа), так и массу материала самих токоведущих элементов, находящихся в область друг друга, как, например, при скрутке или болтовом соединении. Наличие подобной массы в области контакта в совокупности с условием конвективного и лучистого теплообмена может привести к существенному искажению тепловых полей вблизи области контакта.

В данной работе рассматривается именно последний упомянутый вариант нарушения условия идеальности контакта. Оценивается точность расчетов температуры контактного пятна с использованием формулы Хольма-Кольрауша при учёте вышеупомянутых условий.

Постановка задачи.

Рассмотрим влияние «присоединенной массы» на точность расчета температуры контактного пятна с использованием формулы Хольма-Кольрауша на примере контактов двух типов: торцевой контакт двух цилиндрических шин и контакт внахлест двух шин прямоугольного сечения. В случае торцевого соединения цилиндрических проводников обычно используется опрессовка. При этом присоединённая масса соответствует массе наконечника и гильзы. Шины прямоугольного сечения соединяют внахлест (рисунок 1).

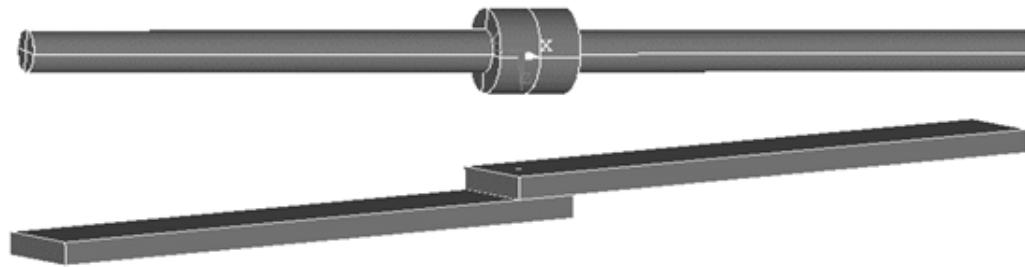


Рисунок 1. Соединение цилиндрических и прямоугольных шин с учётом присоединённой массы.

Численная модель.

Процесс протекания электрического тока через контакты описывается системой уравнений, связывающей электрические и тепловые поля.

$$(\nabla, k \nabla T) + \frac{1}{\sigma} j^2 = 0$$

$$(\nabla, \vec{j}) = 0$$

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}$$

$$\vec{E} = -\nabla \varphi$$

Если уровень нагрева при протекании электрического тока достаточно велик, то происходит изменение свойств материалов и в первую очередь контактного сопротивления, что необходимо учитывать. Конвективное охлаждение всех поверхностей описывается законом Ньютона – Рихмана, лучистый теплообмен законом Стефана – Больцмана.

Расчет проводился при помощи метода конечных элементов. В качестве материала проводников была выбрана медь. Удельное сопротивление считалось зависящим от температуры. Влияние учёта зависимости теплопроводности от температуры лежит в пределах 0.1%, поэтому в данных расчетах его можно не учитывать. Для цилиндрических проводников можно использовать осесимметричную постановку задачи. Кроме того, в данном случае можно рассматривать только половину модели от точки контакта (т.е.



модель одного проводника с областью контакта). Для случая плоских шин необходима трёхмерная постановка задачи, но можно использовать только половину модели.

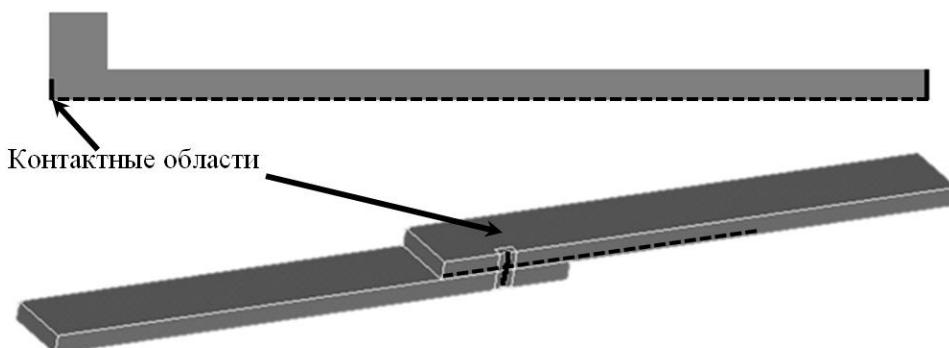


Рисунок 2. Расчетные модели для цилиндрических и плоских шин.

В качестве граничных условий задавалась разность потенциалов между левой и правой границами модели.

В работе были рассчитаны три варианта величины «присоединённой массы» для цилиндрических шин. При этом рассматривались два варианта: с граничными условиями в виде адиабаты и с учётом охлаждения за счёт конвекции и излучения.

Длина участка соединения прямоугольных шин была выбрана равной двойной ширине соединяемых шин, т.е. максимальной величине перекрытия, принятой при подобном соединении [5]. Одно контактное пятно находится в середине соединения.

Результаты моделирования.

Для всех вариантов были выполнены сравнения результатов моделирования и расчетов температуры по формуле Хольма-Кольрауша. На рисунке 2 пунктирными линиями показаны пути, вдоль которых строились линейные графики. Для цилиндрических шин начало координат соответствует области контакта, для прямоугольных – левому краю верхней шины.

В случае граничных условий в виде адиабаты по внешним поверхностям шин не было замечено какого-либо значительного влияния величины присоединённой массы на температуру контакта. В стационарном решении в отсутствии конвекции и излучения её наличие или отсутствие не играет никакой роли в процессе охлаждения контакта.

В случае наличия конвекции и излучения, влияние присоединённой массы становится заметным. Зависимость значения температуры от расстояния до контакта для цилиндрических шин приведены на рисунке 3, где Rd – радиус шин в области контакта с учётом «присоединённой массы» (внешний диаметр опрессовки).

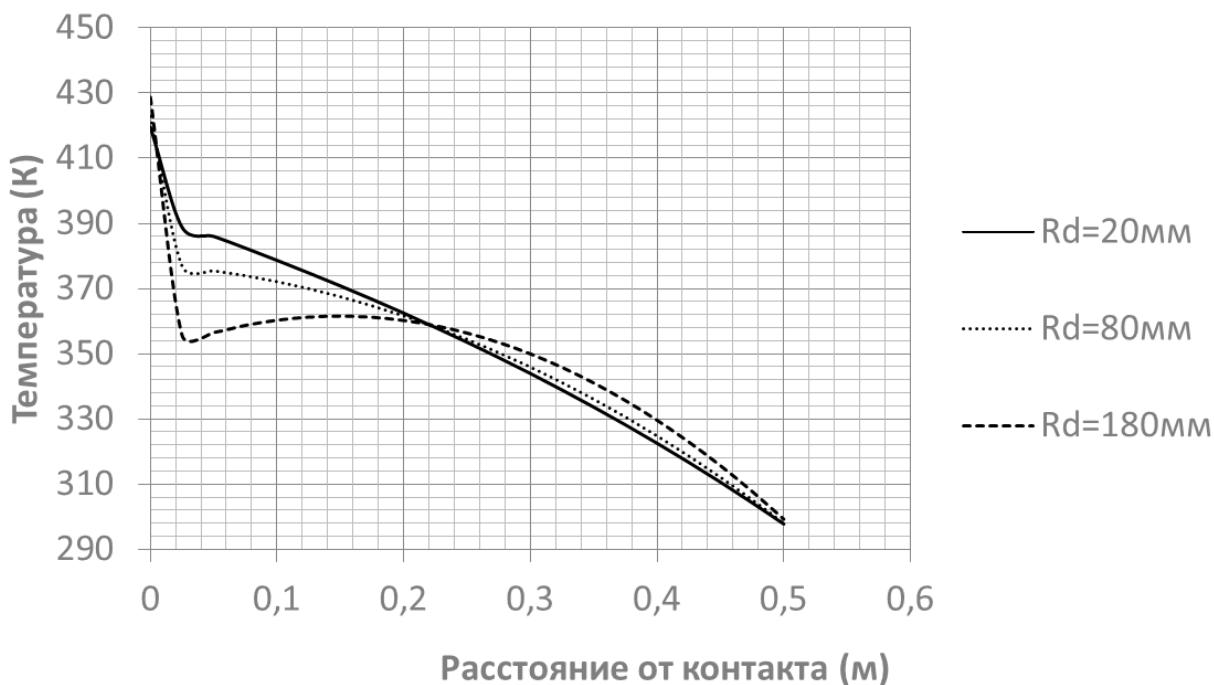


Рисунок 3. Зависимость температуры от расстояния до контакта.

Относительная разность между полученными данными и результатами расчета по формуле Хольма-Кольрауша для случая цилиндрических шин приведена на рисунке 4. Можно отметить, что погрешность определения температуры контакта по формуле Хольма-Кольрауша увеличивается достаточно медленно по мере удаления от области контакта даже для очень

больших величин присоединённой массы, и на расстоянии менее 10 см от контакта она не превышает 10%.

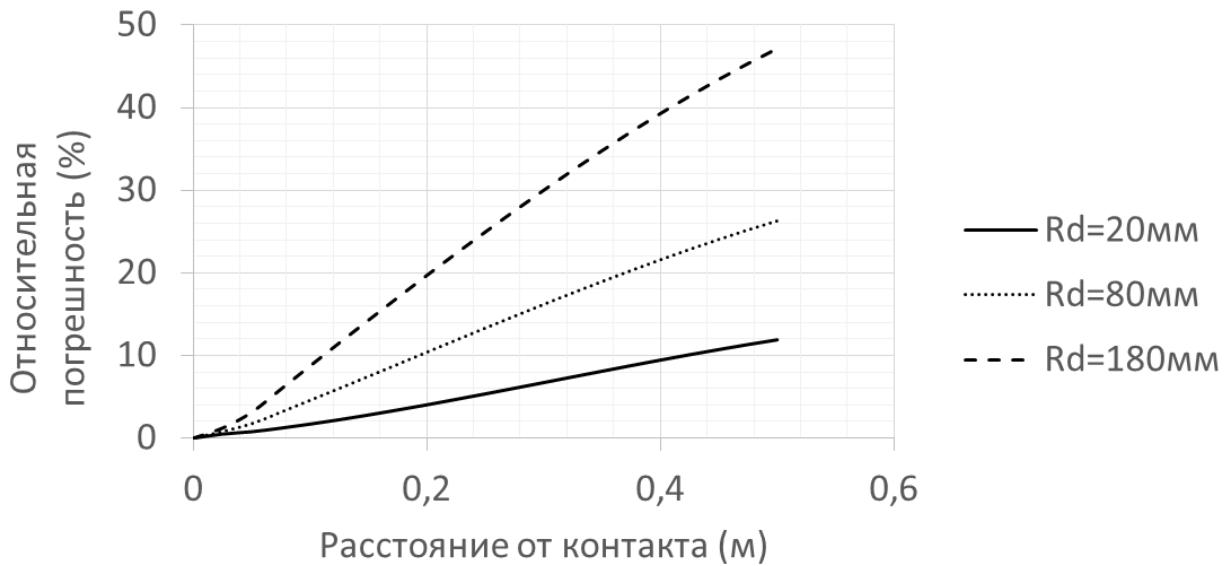


Рисунок 4. Относительная разность между результатами моделирования и расчетом температуры по формуле Хольма-Кольрауша для случая с охлаждением.

Аналогично была рассчитана система двух прямоугольных проводников, соединённых внахлест. Учитывалось конвективное охлаждение и теплообмен излучением.

На рисунке 5 приведены распределения температур и тепловых потоков для случая прямоугольных проводников.

По распределению тепловых потоков можно заметить, что вблизи области контакта присоединённая масса играет роль своеобразного радиатора, отводящего тепло. При этом часть тепла так же отводится вдоль токоведущих шин.

Тем не менее, наличие такого дополнительного охлаждения области контакта не вносит существенного искажения в определение температуры контакта. В данном случае (рис. 6) можно заметить, что вблизи области соединения результаты моделирования хорошо совпадают с результатами



расчета температуры контакта по формуле Хольма-Кольрауша. При увеличении расстояния от контакта до точки измерения температуры расхождение медленно растет.

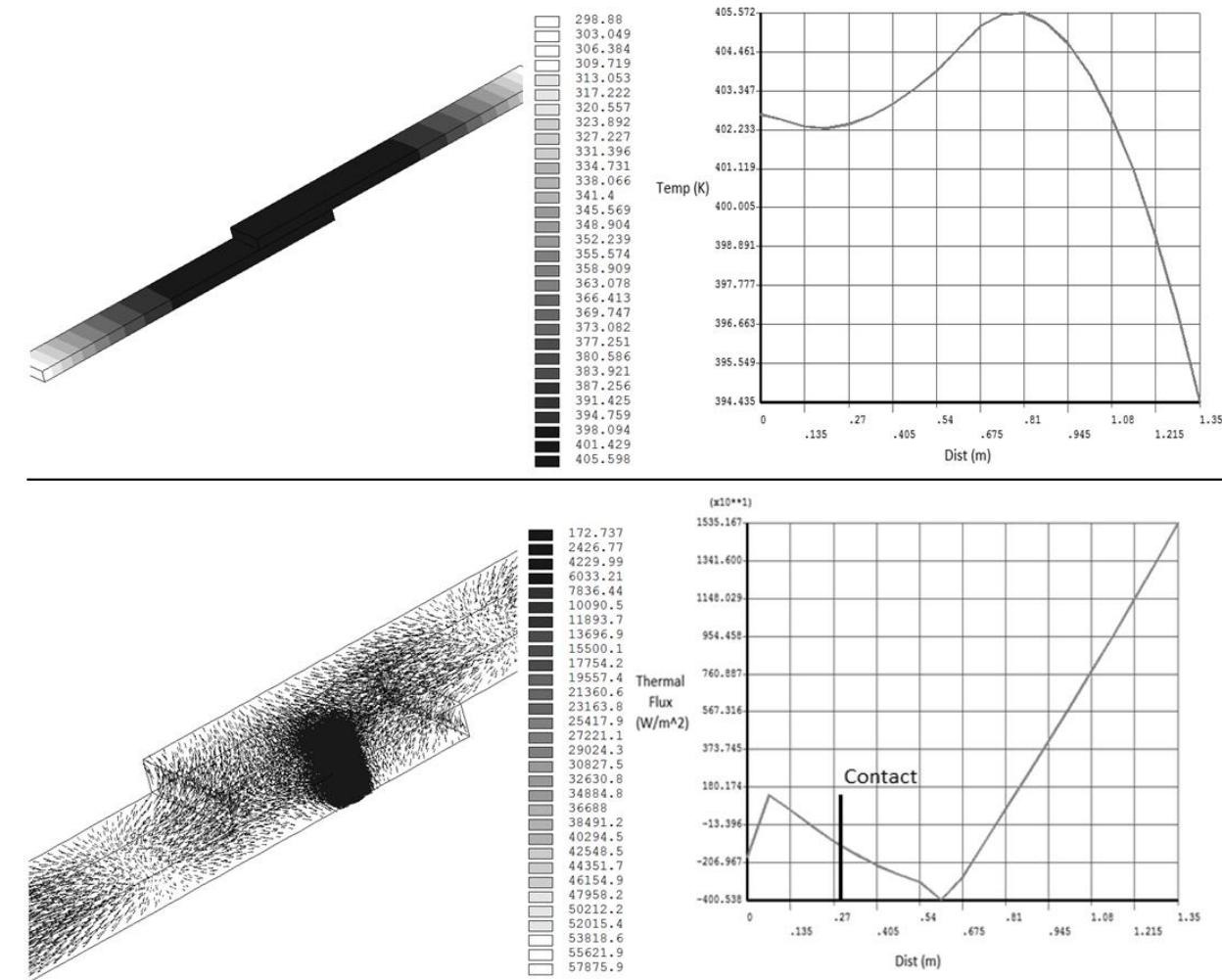


Рисунок 5. Распределение температуры и тепловых потоков в случае прямоугольных шин, соединённых внахлест.

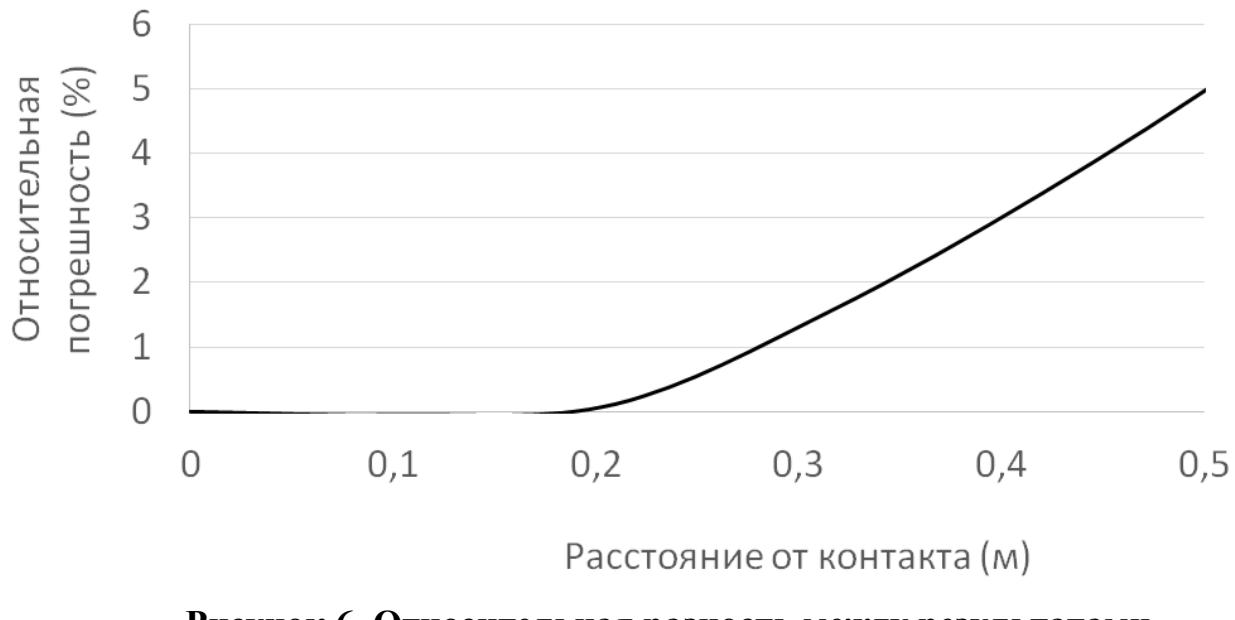


Рисунок 6. Относительная разность между результатами моделирования и расчетом температуры по формуле Хольма-Кольрауша для случая с охлаждением.

Выводы.

Несмотря на то, что при наличии охлаждения «присоединённая масса» работает как дополнительный теплоотвод, различие между результатами моделирования МКЭ и расчетом по формуле Хольма-Кольрауша вблизи контакта не превышает единиц процентов. При этом стоит отметить, что её величина имеет свойство возрастать по мере удаления от контакта. Таким образом, наличие «присоединённой массы» не вносит существенного искажения в определение температуры контакта. Так же нужно отметить, что существенную роль играет конфигурация контактного соединения в каждом конкретном случае.

Литература:

1. ГОСТ 14312-79 Контакты электрические. Термины и определения.
2. Р. Хольм. Электрические контакты. Издательство иностранной литературы. М., 1961.

3. В.В. Афанасьев. Справочник по расчету и конструированию контактных частей сильноточных электрических аппаратов. Энергоатомиздат. Л., 1988.
4. А.А. Комаров, В.Н. Яковлев. Электрические контакты. СамИИТ. Самара, 2001.
5. А.Г. Годжелло, Ю.К. Розанова. Электрические и электронные аппараты. Учебник в двух томах. Издательский центр «Академия». М., 2010.