

УТОЧНЕНИЕ ГРАНИЦ ПРИМЕНИМОСТИ ХОЛЬМОВСКОГО ПРИБЛИЖЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА СОПРОТИВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ

*Санкт-Петербургский государственный университет,
Научно-образовательный центр "Электрофизика" физического факультета,
ул. Ульяновская, д.3, г. Санкт-Петербург, Петродворец, 198504, Россия,
pmf08@mail.ru*

Под электрическим контактом понимают соприкосновение проводящих тел, способных обеспечить непрерывность электрической цепи. Существует огромное число контактов, различающихся областью применения, – от микро- и наноконтактов, используемых в различных электронных устройствах, до массивных контактов, применяющихся в силовой энергетике и способных пропускать и коммутировать токи в десятки и сотни килоампер. Каждый тип электрических контактов характеризуется своим набором параметров, определяющих его свойства [1, 2]. Одной из основных характеристик контактов любого типа является величина контактного сопротивления. Оно определяется эффектом стягивания линий тока к контактному пятну и наличием оксидных пленок. В ряде случаев влиянием последних можно пренебречь, например если контакты расположены в вакууме или специальным образом обработаны.

При проектировании контактов важно уметь тем или иным способом рассчитывать величину их сопротивления. Возможности аналитического решения задачи ограничены случаем контактирования двух проводящих полупространств, соединенных пятном круглой или эллиптической формы. При этом контактное сопротивление может быть определено по известным формулам Р. Хольма [1]. В случае пятна круглой формы выражение для контактного сопротивления имеет наиболее простой вид:

$$R_{cont} = \frac{\rho}{2a}. \quad (1)$$

Здесь ρ – удельное сопротивление материала контактов, a – радиус контактного пятна. На практике это выражение широко применяется для оценки сопротивления контактов конечных размеров, что не всегда справедливо. На рис. 1 представлено распределение силовых линий и эквипотенциалей для одного из полупространств. Наличие вблизи области стягивания границ контактов приведет к изменению данного распределения, что неизбежно внесет погрешность в указанную оценку контактного сопротивления.

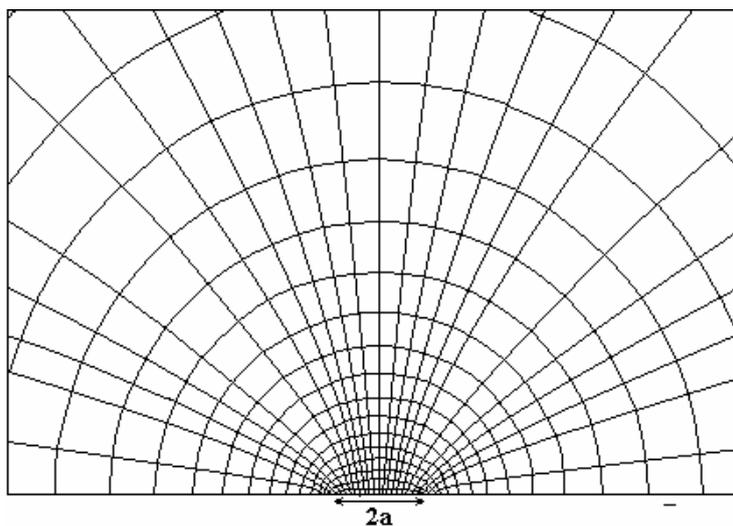


Рис. 1

Рассмотрим вопрос о границах применимости данного приближения на примере численных расчетов контактного сопротивления электродов цилиндрической формы при наличии одного или нескольких контактных пятен и на примере токоведущих шин прямоугольного сечения, соединенных одним пятном. Ограничимся случаем протекания через контакты постоянного тока малой амплитуды, при котором не происходит значительного их нагрева. Это позволит решать задачу в линейном приближении, полагая свойства материала не зависящими от температуры. Форма контактных пятен при этом не изменяется в процессе протекания тока. Использование этого приближения позволит выявить те особенности, которые определяются геометрией электродов и расположением контактных пятен. Расчеты будут проводиться в ANSYS, в основе которого лежит метод конечных элементов.

Начнем рассмотрение со случая двух электродов, представляющих собой одинаковые соосные цилиндры C_1 и C_2 (рис. 2), расположенные так, что их торцы совпадают, образуя так называемую кажущуюся контактную поверхность A_a . Электрически электроды соединены контактным пятном A_c круглой формы, расположенным в центре поверхности A_a .

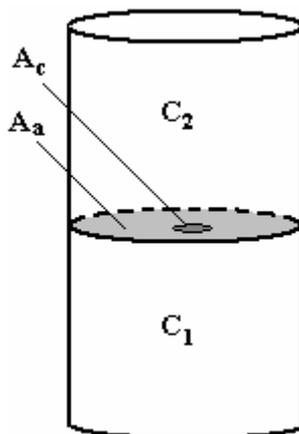


Рис. 2

Контактное сопротивление пары электродов определяется разностью сопротивления всего образца и суммарного сопротивления двух цилиндров – C_1 и C_2 :

$$R_{cont} = \frac{U_{ab}}{I} - \rho \frac{2h}{\pi r^2}, \quad (2)$$

где U_{ab} – разность потенциалов между нижним и верхним основаниями электродов, I – протекающий через электроды ток, h – высота цилиндров, r – их радиус. Учитывая симметрию модели, при численных расчетах можно решать задачу в осесимметричной постановке для одного из электродов. В дальнейшем под контактным сопротивлением R_c будем понимать сопротивление, рассчитанное для одного электрода. На контактной поверхности зададим величину протекающего тока, на противоположном торце – условие равенства потенциала, на всех остальных поверхностях – условие равенства нулю нормальной компоненты плотности тока.

На рис. 3 приведена зависимость контактного сопротивления от отношения радиуса электрода r к радиусу контактного пятна ac в том случае, когда высота и радиус цилиндров на два порядка больше радиуса контактного пятна (эквивалент двух полубесконечных электродов). Сплошная линия соответствует графику, построенному по (1), а точки получены в результате численного расчета. Хорошее совпадение результатов говорит о корректности применяемой схемы численного решения.

Определим влияние границ электродов на контактное сопротивление. На рис. 4 представлено искажение силовых линий и линий равного потенциала для верхнего электрода при наличии границ (ср. с рис. 1) для разного соотношения его высоты и радиуса. Линии тока вблизи торцевой поверхности, которая предполагается эквипотенциальной, перпендикулярны ей, а вблизи боковой поверхности ток течет параллельно боковым границам. Искажение формы линий тока также очевидно.

Будем приближать боковую поверхность электрода к пятну, уменьшая радиус цилиндров. На рис. 5,а приведена зависимость контактного сопротивления от отношения радиуса модели к радиусу контактного пятна. Радиус контакта здесь и далее принимаем равным 1мм, а в качестве материала электродов выбираем медь. При этом по хольмовской формуле (1) для одного электрода контактное сопротивление равно 4,5 мкОм.

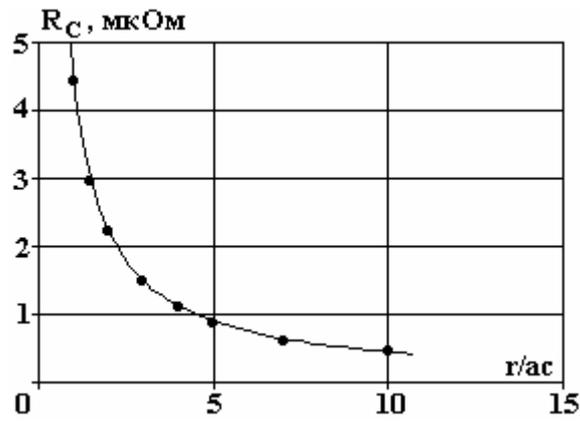


Рис. 3. Зависимость R_C от относительного радиуса электрода

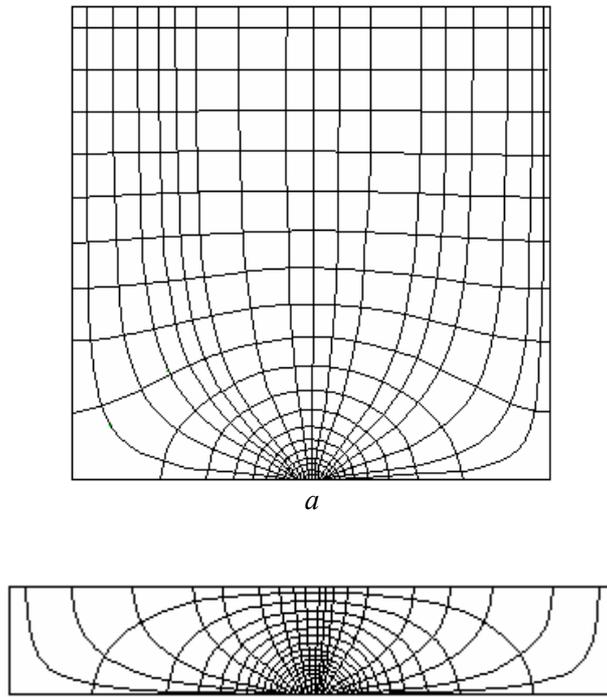


Рис. 4

Высота модели фиксирована и равна 100 мм, радиус модели изменяется от 1,1 до 200 мм. Видно, что при приближении боковой поверхности к контактному пятну контактное сопротивление падает, так как уменьшается эффект стягивания. В том случае, когда радиус модели на порядок больше радиуса контактного пятна, отклонение контактного сопротивления от значения, рассчитанного по (1), составляет около 15%.

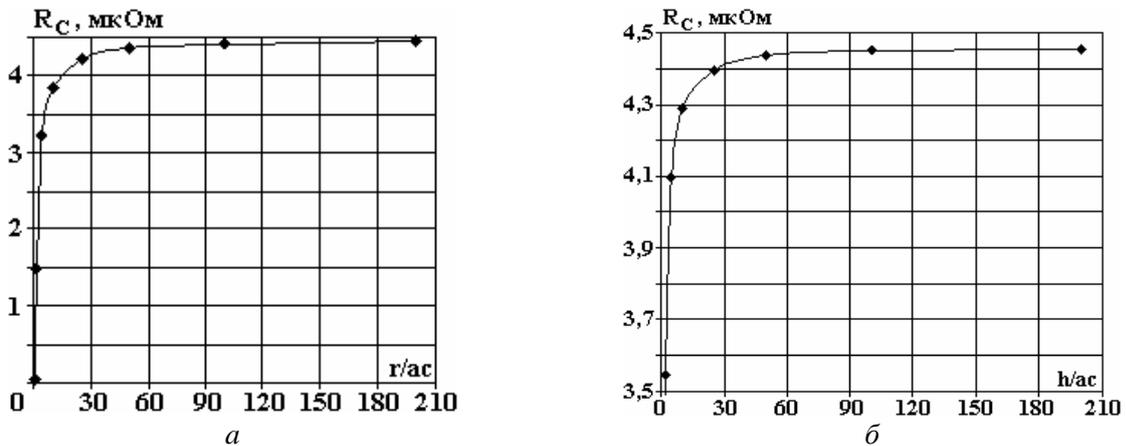


Рис. 5. Зависимость R_C от радиуса модели (а) и от высоты модели (б)

Теперь построим график зависимости контактного сопротивления от отношения высоты электродов h к радиусу контактного пятна (рис. 5,б) при неизменном радиусе. В этом случае искажение поля в области стягивания не такое сильное, как при приближении боковых границ, и, следовательно, не такое сильное изменение контактного сопротивления. Контактное сопротивление также уменьшается при приближении верхней границы к контактному пятну. В том случае, когда высота цилиндров на порядок больше радиуса контактного пятна, отклонение величины контактного сопротивления от величины, полученной по формуле (1) для бесконечных полупространств, составляет менее 4%.

Определим, как изменяется контактное сопротивление, если перемещать контактное пятно к боковой границе электрода (рис. 6). Эта задача, так же как и рассмотренные выше задачи влияния границ, не имеет аналитического решения. При этом наблюдаются следующие явления: те силовые линии, которые находятся между пятном и ближайшей границей, выпрямляются, то есть для них эффект стягивания уменьшается, что должно понизить величину контактного сопротивления. С другой стороны, для силовых линий, находящихся с другой стороны, эффект стягивания возрастает. Заранее не очевидно, как поведет себя в этом случае контактное сопротивление в целом.

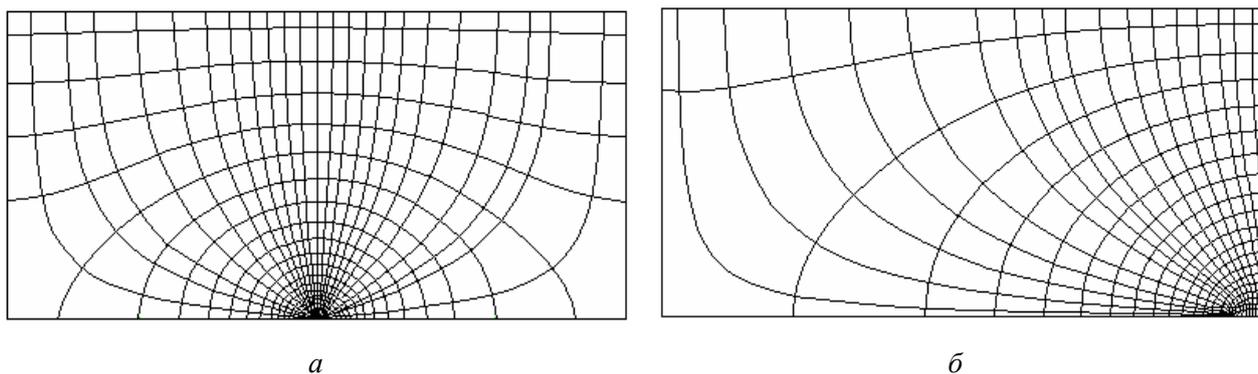


Рис. 6

На рис. 7 приведен график зависимости контактного сопротивления от отношения расстояния между центром контактного пятна и серединой модели d к радиусу контактного пятна. Оказалось, что при приближении пятна к границе контактное сопротивление возрастает, то есть при его расчете нужно учитывать не только геометрические размеры модели, но и близость пятна к границе. В рассмотренном случае при смещении пятна от центра к краю сопротивление возросло на 35%.

В зависимости от формы электродов число контактных пятен может быть различным. Например, в некоторых цанговых соединениях оно может достигать нескольких десятков. Поэтому интересным является исследование вопроса влияния на контактное сопротивление взаимного расположения пятен и их близости к границам электродов.

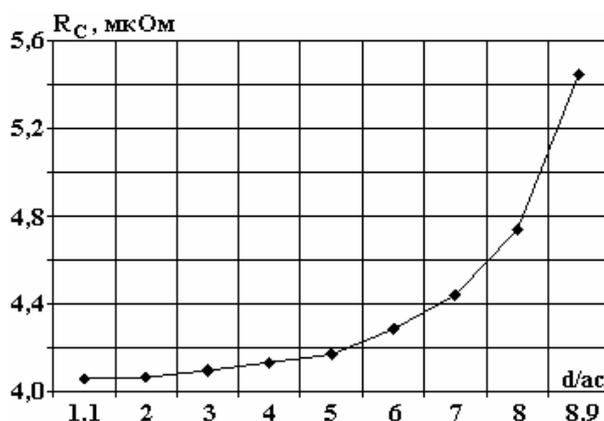


Рис. 7. Зависимость сопротивления контакта от положения контактного пятна

Рассмотрим случай наличия двух контактных пятен одинакового размера (рис. 8). Когда два пятна располагаются рядом, то имеется единая область стягивания. При удалении пятен друг от друга (левое пятно в нашем случае остается на оси симметрии электродов) области стягивания разделяются, стремясь к случаю двух независимых областей. При дальнейшем увеличении расстояния между пятнами начинает сказываться близость границы для правого пятна, и начинают проявляться эффекты, рассмотренные выше.

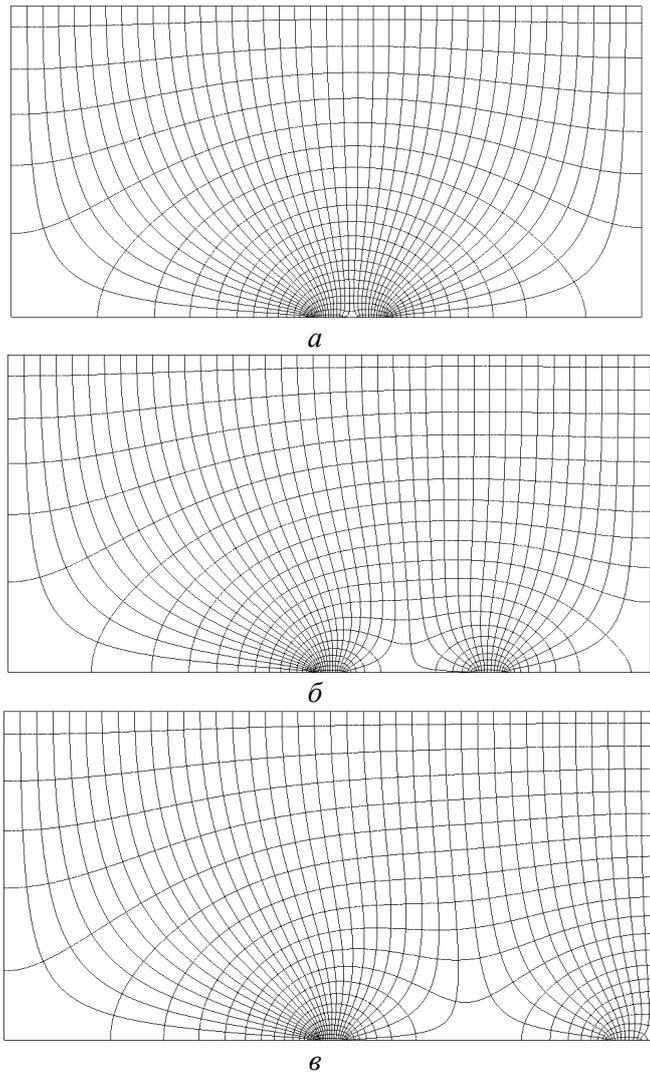


Рис. 8

На рис. 9 приведена зависимость контактного сопротивления от отношения расстояния между контактными пятнами d к радиусу контактного пятна. Сначала, при удалении пятна от центра модели, контактное сопротивление уменьшается, затем выходит на постоянное значение, которое соответствует случаю практически независимых контактных пятен, находящихся вдали от боковой границы контакта. При приближении к внешней поверхности электрода контактное сопротивление снова увеличивается.

Пятна перестают существенно влиять друг на друга, когда расстояние между их центрами в 10–20 раз больше их радиусов. Контактное сопротивление электродов с близко расположенными пятнами или с пятном, расположенным близко к границе, оказалось существенно больше сопротивления невзаимодействующих контактных пятен (приблизительно на 40–50%).

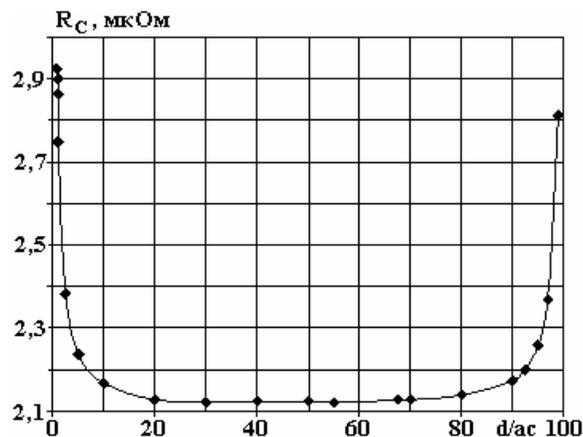


Рис. 9. Зависимость контактного сопротивления от относительного расстояния

Ниже представлен случай восьми одинаковых круглых пятен, соединяющих два проводящих цилиндра. Высота и радиус модели много больше радиуса контактных пятен. Будем перемещать контактные пятна от центра модели к ее боковым границам.

На рис. 10 приведена зависимость контактного сопротивления от отношения расстояния между центром модели и центром контактных пятен к радиусу контактного пятна. Качественно эта зависимость ведет себя так же, как и в случае двух контактных пятен.

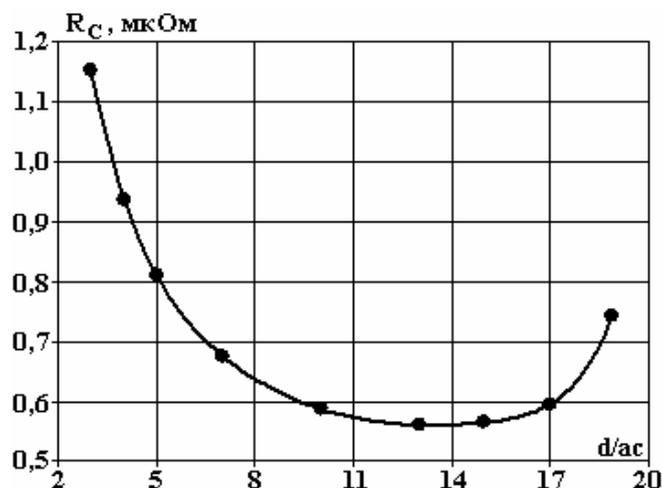


Рис. 10. Зависимость R_c от расстояния от центра модели к центру контактного пятна

Рассмотрим еще один часто встречающийся тип контактов – токоведущие шины прямоугольного сечения. В местах их соединения из-за эффекта стягивания линий тока возникает повышенное контактное сопротивление, наличие которого может привести к недопустимому перегреву шин. Предположим, что шины соединены круглым контактным пятном.

Посмотрим, как контактное сопротивление зависит от ширины b и толщины a шины. На рис. 11,*a* приведено распределение силовых линий и линий равного потенциала для половины одной из шин (вид сбоку), а на 11,*б* – вид сверху для той же шины.

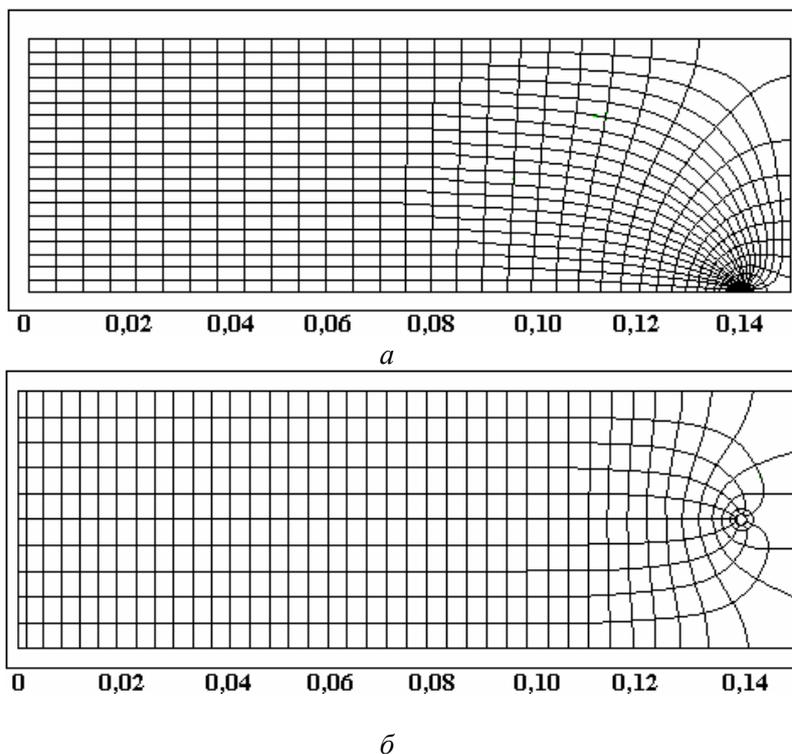


Рис. 11

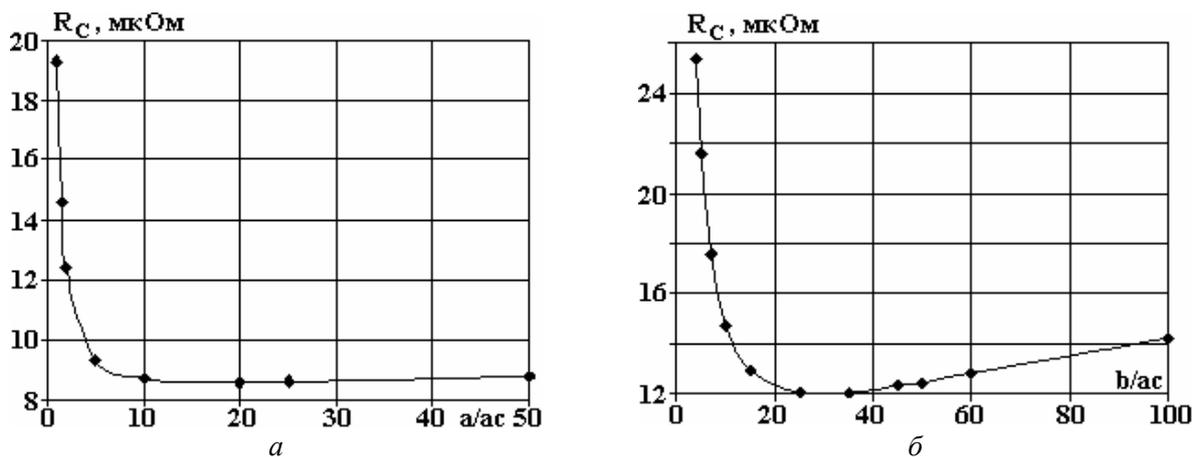


Рис. 12. Зависимость контактного сопротивления от толщины (а) и ширины (б) шины

Картина силовых линий электрического поля оказывается сложнее, чем в случае цилиндрических электродов. Далее приведены зависимости контактного сопротивления от отношения толщины шины a к радиусу контактного пятна при ширине, равной 5 см (рис. 12,а), и от отношения ширины b к радиусу контактного пятна при толщине 0,2 см (рис. 12,б).

Значение контактного сопротивления при варьировании размеров в рассмотренных пределах изменяется более чем в 2 раза и при определенных параметрах сечения шин может существенно отличаться от значения, вычисленного по (1), которое составляет 9 мкОм.

Выводы

Исследовано влияние границ электродов различной формы на величину контактного сопротивления, обусловленного стягиванием линий тока к проводящему контактному пятну. Показано, в каких случаях может иметь место значительное отличие результатов от величины, определяемой выражением (1), справедливым для случая контактирующих полупространств. Наибольшее отличие возникает для электродов, характерные размеры которых сравнимы с размером контактных пятен, а также при приближении контактного пятна к границе электродов. Показано влияние взаимного расположения пятен и их близости к границе электродов на величину контактного сопротивления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хольм Р. Электрические контакты. М.: Издательство иностранной литературы, 1961.
2. Мышкин Н.К., Конциц В.В., Браунович М. Электрические контакты. М.: Издательский дом Интеллект, 2008.

Поступила 25.03.10

Summary

The paper presents the computation results for passage of current through electrodes of various shapes. In particular, cylindrically shaped contacts and rectangular current-carrying buses were considered. The effect of electrode boundaries and location of contact spots on contact resistance was estimated. It was shown when the contact resistance can appreciably differ from the values found basing on available analytical formulas.