

# Прямоугольные электрические соединители.

## Оптимизация тепловых режимов работы электрических соединителей

**В связи с непрерывной миниатюризацией РЭА (и, как следствие, уменьшением размеров применяемых радиоэлектронных компонентов) и в то же время с увеличением ее энергонасыщенности остро встает вопрос о максимальном использовании возможностей, заложенных в конструкциях того или иного электронного компонента. Это в первую очередь относится и к прямоугольным электрическим соединителям, чьи габаритные размеры больше по сравнению с основными радиоэлектронными компонентами.**

Леонид Сафонов  
Александр Сафонов

edet@online.debryansk.ru

### Введение

При оптимизации теплового режима электрического соединителя необходимо обеспечить равные условия работы всех контактных пар и создать равномерную тепловую нагрузку по всему объему изолятора соединителя. Это очень сложная задача, которая до сих пор в полном объеме не решена. На это есть много причин, связанных как с большим количеством факторов, влияющих на условия работы соединителя, так и с отсутствием методики решения этой проблемы, которая учитывала бы взаимное влияние этих факторов друг на друга и представляла бы картину в целом.

Существующая в настоящее время методика определения предельно допустимых значений электрических параметров и режимов эксплуатации электрических соединителей не в полной мере отвечает современным требованиям.

По данной методике определяется максимально допустимый ток, который может проходить через конкретный контакт соединителя с учетом допустимого перегрева и теплостойкости пластмассы. Сначала устанавливаются группы контактов и ток, проходящий через них, затем определяется допустимая суммарная токовая нагрузка на соединитель. Дополнительно уточняется максимальный ток на одиночный контакт при 10% нагрузки от максимального тока нагрузки остальных контактов. Даются ограничения по нагружению током соседних контактов.

Такие определения и наложение различных ограничений на основные параметры производятся, как правило, по результатам испытаний и ранее накопленным статистическим данным, полученным в процессе эксплуатации соединителей-аналогов. Но не всегда можно это делать с необходимой точностью, особенно если это касается новых разработок, где применяются нетрадиционные решения. Из-за отсут-

ствия точных расчетов конструктор вынужден вводить поправочные коэффициенты, тем самым заведомо занижать технические параметры соединителя.

В результате проведения уточненных испытаний, с целью определения реальных конструктивно-технологических запасов по основным параметрам соединителей, было установлено, что практически у всех моделей есть возможность увеличения суммарной токовой нагрузки на 10–15%, при обеспечении всех требований по надежности и сроку эксплуатации. Это еще раз подтверждает необходимость уточнения существующей методики определения предельно допустимых значений электрических параметров и режимов эксплуатации соединителей.

### Температура эксплуатации соединителей и ее влияние на их работоспособность

Важным фактором при проектировании и эксплуатации электрических соединителей является обеспечение равномерной токовой и тепловой нагрузки по всему устройству. Создание оптимального теплового режима работы электрических соединителей позволит решить технические проблемы, возникающие при их эксплуатации в составе РЭА.

Рабочая температура электрического соединителя складывается из температуры окружающей среды и температуры перегрева контактов:

$$t_c = t_{o,c} + t_{n,k}, \quad (1)$$

где  $t_c$  — температура соединителя, °C;  $t_{o,c}$  — температура окружающей среды;  $t_{n,k}$  — температура перегрева контактов.

Разработчик и изготовитель не могут повлиять на снижение температуры окружающей среды соединителя, они обязаны ее воспринимать как установленный параметр, который необходимо учитывать при

$$t_{mi} = \frac{B(t_{mo} + 273)}{(t_{mo} + 273) \times (\ln \tau_{ni} - \ln \tau_{no}) + B} - 273 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (2)$$

$$t_{mo} = \frac{B(t_{mm.з} + 273)}{(t_{mm.з} + 273) \times (\ln \tau_{no} - \ln \tau_{nm.з}) + B} - 273 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (3)$$

расчете теплостойкости материалов изоляторов, контактов, покрытий, припоев и всего соединителя. В задачу разработчика в данном случае входит обеспечение минимально возможной рабочей температуры соединителей за счет:

- снижения температуры перегрева контактов;
- максимального отвода тепла от соединителя;
- оптимального распределения токовой нагрузки на контакты, в зависимости от их расположения в соединителе.

Снижение температуры перегрева контактной пары, при конкретной токовой нагрузке, можно осуществить за счет применения материалов с повышенной электро- и теплопроводностью, покрытий с малым удельным сопротивлением и температурным коэффициентом сопротивления, стойких к агрессивным средам, а также использования достаточно высокого контактного давления, способного разрушать в процессе работы различные окисные пленки и пленки потускнения.

Максимальный отвод тепла от соединителя в окружающую среду происходит при применении материалов контактных пар, изолятора и корпусов с высокой теплопроводностью, а также дополнительных конструктивных элементов в изоляторах и корпусах, обеспечивающих максимальную поверхность теплоотдачи.

И самым важным из факторов обеспечения нормальной работы соединителя является оптимальное распределение токовой нагрузки на его контакты. Контакты в соединителе ввиду их различного расположения (они могут находиться в крайних рядах или в центре соединителя) в процессе эксплуатации испытывают различные тепловые нагрузки из-за неравных условий теплоотвода и взаимного влияния их температурных полей друг на друга. Это относится и к участкам изолятора, находящимся вокруг контактов. Задача конструктора состоит в том, чтобы так распределить требуемую суммарную токовую нагрузку между контактами, чтобы обеспечить во всем объеме соединителя, на всех его участках примерно равную температуру. Методом простого подбора и интуитивного распределения эту задачу решить практически невозможно, здесь необходимо применять специальные расчетные методы и инструменты.

Требования по надежности к электрическим соединителям предусматривают определенную минимальную наработку соединителей в определенных температурных режимах. По сложившимся сегодня нормам она устанавливается в пределах от 500 до 20 000 часов в допустимом температурном режиме эксплуатации.

Каждому значению минимальной наработки ( $\tau_{ni}$ ) соответствуют допустимые значения температурных режимов эксплуатации соединителя ( $t_{mi}$ ), которые рассчитываются по формуле (2), где  $B$  — энергетический параметр (для основной массы соединителей его принимают равным 7000);  $i = (1 \dots n)$  — порядковый номер указанных в ОТУ значений минимальной на-

работки соединителя;  $\tau_{no}$  — нижнее из указанных в ОТУ значений минимальной наработки соединителя (принимается равным 100 часам).

$t_{mo}$  — максимальная температура эксплуатации соединителя (3), где  $t_{mm.з}$  — максимальная температура эксплуатации соединителя по ТЗ;  $\tau_{nm.з}$  — минимальная наработка соединителя по ТЗ.

Указанные в ТЗ значения  $t_{mm.з}$  и  $\tau_{nm.з}$  являются исходными данными для расчета минимальной наработки в других температурных режимах, включая максимально допустимые температурные режимы соединителя.

Если рассмотреть зависимость величины минимальной наработки соединителей от допустимых значений температурных режимов их эксплуатации, которая выражается в виде функции:

$$\tau_{ni} = F(t_{mi}), \quad (4)$$

то можно установить следующее. Для основной массы соединителей снижение температуры эксплуатации в 1,5 раза позволит обеспечить увеличение минимальной наработки в 7–8 раз и довести ее до 150 000–180 000 часов. Эту зависимость можно проследить на примере соединителей серии СНП-268 — аналогов серии D-Sub (таблица).

**Таблица. Гамма-процентная наработка до отказа в допустимом температурном режиме эксплуатации**

Гамма-процентная наработка до отказа, час	Температурный режим, °C
20 000	115
25 000	110
30 000	95
40 000	92
50 000	89
80 000	85
100 000	82
130 000	75
150 000	72
175 000	69

С учетом вышеизложенного трудно переоценить значение создания оптимального теплового режима эксплуатации для электрических соединителей.

В основном приходится рассматривать температурные ограничения для термопластичных материалов, которые используются при изготовлении изоляторов и покрытий контактных пар. В некоторых случаях приходится в этот ряд включать и материалы для изготовления контактных электродов.

При изготовлении изоляторов широкое применение, как на отечественных предприятиях, так и за рубежом, нашли такие термопластичные материалы, как поликарбонаты и техноиды (пластмассы на основе полиамидных смол ПА-6 и ПА-66 с различным процентным содержанием наполнителя — стекла). По теплостойкости они удовлетворяют указанному диапазону температур эксплуатации соединителей.

На основании проведенных исследований Международная Электротехническая Комиссия (МЭК) установила, что для серебряных и серебросодержащих покрытий контактов в воздухе допустимая температура эксплуатации ограничивается только теплостойкостью изоляционных и пружинных частей. Основанием для этого послужило то, что серебро ведет себя иначе, чем другие контактные материалы. Это подтверждено и многолетней практикой применения серебряных покрытий и на предприятии ФГУП «Карачевский завод «Электродеталь».

Для подавляющего большинства металлов, используемых для изготовления и покрытия контактов, допустимую максимальную температуру эксплуатации приходится ограничивать потому, что повышенная температура приводит к прогрессивному образованию плохо проводящих окислов, увеличивающих переходное сопротивление контактов. Окислы же серебра с повышением температуры разрушаются, а переходное сопротивление контактов при этом не увеличивается, а наоборот — уменьшается.

Разрушение поверхностных пленок при этом легко происходит при контактном нажатии в несколько десятков граммов.

Однако для электрических соединителей, за исключением соединителей с «нулевым» усилием сочленения, необходимо иметь в виду, что в процессе их сочленения и расчленения происходит скольжение контактов относительно друг друга, и поэтому приходится учитывать так называемое явление «заедания».

При повышенном нагреве скользящих контактов, покрытых серебром, трение между ними возрастает настолько, что их трудно бывает расчленивать. Это происходит из-за того, что окислы, находящиеся на поверхности контактов и являющиеся своеобразной смазкой, при повышенной температуре разрушаются, и трение резко возрастает. При достаточном контактном нажатии в течение определенного времени на контактах в результате диффузии возникают очаги «холодной сварки».

Результаты исследований ряда институтов и работы, проведенные на нашем предприятии, позволили определить оптимальное значение температур, в интервалах которых целесообразно использовать серебро и серебряные покрытия электрических контактов, работающих в режиме сочленения и расчленения.

Определение зависимости коэффициента трения серебряных контактов от температуры проводилось по схеме, изображенной на рис. 1.

Контакты 1 и 2, прижатые друг к другу силой  $P$ , нагревались посторонним источником 3. Определялась сила  $F$ , необходимая для перемещения контакта 1 относительно контакта 2.

На рис. 2 приведена полученная зависимость коэффициента трения  $\mu = F/P$  от температуры.

Установлено, что при температуре выше 120 °C коэффициент трения серебра резко возрастает, поэтому целесообразно использовать

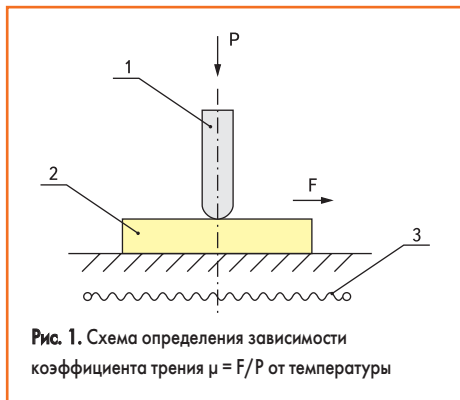


Рис. 1. Схема определения зависимости коэффициента трения  $\mu = F/P$  от температуры



Рис. 2. Зависимость коэффициента трения от температуры

серебряные покрытия для контактных пар в электрических соединителях до 120 °C. Применение серебряных покрытий с добавкой сурьмы позволяет несколько повысить температуру эксплуатации контактов.

Что касается покрытий контактов золотом и его сплавами, то здесь допустимая температура эксплуатации может достигать более высоких значений, без значительного ухудшения электрических и механических параметров контактов, и находится в пределах 160...180 °C.

Существующая практика применения основной массы электрических соединителей с изоляторами из термопластичных материалов в радиоэлектронной аппаратуре, как зарубежного, так и отечественного производства, показывает, что на современном этапе максимальная температура эксплуатации в пределах 115...125 °C (с учетом перегрева контактов) является достаточной. Эти значения температур фактически регламентированы и в действующей НТД.

#### Определение теплового режима работы электрических соединителей

Рассмотрим основные принципы и подходы к решению задачи определения теплового режима работы электрического соединителя. Это позволит оценить работоспособность электрического соединителя с точки зрения обеспечения требуемых температурных режимов

$$Q_1 = \frac{R_{пер.}(O) \times \alpha + \sqrt{144L^2 \times T^2 - 24L \times R^2 \times T \times \alpha + 36L \times R^2 + R^4 \times \alpha^2 - 12L \times T}}{12L} \quad (9)$$

эксплуатации на стадии проектирования и исключить экономические издержки по устранению несоответствий при изготовлении опытных серий таких устройств.

При определении реального теплового режима электрического соединителя необходимо учитывать следующие основные факторы:

- температуру окружающей среды;
- количество тепла, выделяемого на каждой контактной паре;
- суммарное качество выделяемого тепла;
- количество тепла, которое может рассеять соединитель в окружающую среду;
- технические характеристики материалов, из которых он изготовлен.

Все эти факторы необходимо определять и учитывать при установившемся режиме работы соединителя. За установившийся режим его работы принимается такой, когда в течение 15 минут температура перегрева контактов изменяется не более чем на 1 °C. Под температурой перегрева контактов понимаются превышение температуры контактов электрического соединителя над температурой окружающей среды при прохождении через них электрического тока.

При прохождении электрического тока через контакт на нем выделяется мощность в виде тепла, равная произведению квадрата силы тока на сопротивление контакта:

$$P = I^2 \times R_k, \quad (5)$$

где  $P$  — мощность, выделяемая на одной контактной паре соединителя;  $I$  — ток, проходящий через контактную пару;  $R_k$  — полное сопротивление контактной пары.

Необходимо различать два тепловых режима работы контактов. Первый режим характеризует температура локального перегрева, второй — температура перегрева контактных электродов, то есть «тела» контактов.

Для надежной работы электрических соединителей в составе РЭА необходимо, чтобы тепловые режимы работы контактов под токовой нагрузкой не приводили к физико-химическим изменениям, как в самой контактной паре, так и в изоляторе, в котором они установлены [12].

#### Температура локального перегрева

При прохождении электрического тока через контактную пару температура в зоне контактирования почти мгновенно достигает своего максимального значения. Уже через  $1 \times 10^{-4} \dots 5 \times 10^{-3}$  с [1] тепло, выделяемое в области контактирования, компенсируется теплом, отдаваемым областью контактирования контактным электродам. Разность между температурой в точках контактирования и температурой контактных электродов называется температурой локального перегрева контакта. Она не должна достигать значений, при которых значительно изменяются механические свой-

ства материалов контакта или его покрытия (наступает размягчение или плавление и т. п.), повышается химическая активность, вызывающая повышенное пленкообразование.

В [1] выведено соотношение между температурой локального перегрева и падением напряжения на переходном сопротивлении контакта:

$$Q_1 = -T + \sqrt{T^2 + \frac{U_{пер.}^2(Q)}{4L}}, \quad (6)$$

где  $T$  — температура контактного электрода по шкале Кельвина;  $L$  — коэффициент Видемана-Лоренца, равный  $2,4 \times 10^{-8} \text{ В}^2/\text{°C}$ ;  $U_{пер.}(Q_1)$  — падение напряжения на переходном сопротивлении.

Падение напряжения на переходном сопротивлении определяется согласно закону Ома:

$$U_{пер.}(Q_1) = R_{пер.}(Q_1) \times I, \quad (7)$$

где  $R_{пер.}(Q_1)$  — сопротивление переходной зоны;  $I$  — сила тока, проходящего через контакт.

Сопротивление переходной зоны, в свою очередь зависит от температуры локального перегрева. Согласно формуле [1]:

$$R_{пер.}(Q_1) = R_{пер.}(O) \times (1 + 2/3\alpha \times Q_1), \quad (8)$$

где  $R_{пер.}(O)$  — сопротивление переходной зоны при температуре, равной 0 °C;  $\alpha$  — температурный коэффициент сопротивления материала контакта. При расчете локального перегрева под материалом контакта понимается материал покрытия контакта, если оно имеет место.

В соответствии с формулами (6), (7) и (8), температура локального перегрева определяется по формуле (9).

В действительности контактные поверхности покрыты пленкой, и ток через контакты течет благодаря туннельному эффекту, в результате чего происходит асимметричный нагрев контактных поверхностей. Анодный контакт нагревается сильнее за счет избыточной энергии электронов, приобретаемой ими в туннельном промежутке. В результате чего анод оказывается более нагретым, чем катод. Это дополнительное тепло отдается катоду через пленку, плохо проводящую тепло, но большая его часть передается телу контакта и излучается им в пространство. Разность между температурами катода и анода можно определить из выражения:

$$Q_f = \frac{U_f}{\lambda \times \rho} \times \frac{U_{пер.}}{2U_{пер.} + U_f}, \quad (10)$$

где  $U_{пер.}$  — падение напряжения на переходном сопротивлении;  $U_f$  — падение напряжения по сечению пленки;  $\lambda$  — теплопроводность материала контакта.

На практике при анализе локального перегрева ввиду проблематичности определения падения напряжения по сечению пленки рекомендуется использовать выражение (9).

Температуру переходной зоны контактирования определяют по формуле:

$$t = Q_1 + t_{конт.}, \quad (11)$$

где  $t_{\text{конт}}$  — температура точки контакта, удаленной от переходной зоны.

Максимально допустимая температура переходной зоны определяется температурой размягчения материала контакта (температура рекристаллизации). Она находится в пределах 100–1000 °С: для золота  $t = 100$  °С; для серебра  $t = 180$  °С; для вольфрама  $t = 1000$  °С.

### Температура перегрева контактных электродов

Допустимая температура перегрева контактных электродов электрических соединителей ограничивается в основном физико-химическими и электрическими свойствами применяемых материалов. Критичными в этом отношении являются металлы покрытий контактов и пластмассы изоляторов, особенно из термопластичных материалов.

Для определения температурных полей в изоляторе электрического соединителя использовался метод конечных элементов (далее МКЭ) [4–6] — один из самых эффективных современных методов численного решения инженерных, физических и математических задач с применением вычислительной техники. Он основан на минимизации функционала, математически эквивалентного дифференциальному уравнению, описывающему задачу теплопроводности.

Основная идея МКЭ состоит в том, что любую непрерывную величину, в нашем случае температуру, можно аппроксимировать дискретной моделью, которая строится на множестве кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе подобластей.

В итоге необходимо решить систему линейных алгебраических уравнений:

$$[K] \times \{T\} = \{P\}, \quad (12)$$

где  $[K]$  — матрица теплопроводности;  $\{P\}$  — вектор узловых нагрузок;  $\{T\}$  — искомый вектор температур в узлах.

Для решения задачи определения температурных полей в изоляторе электрического соединителя предлагается использовать двухмерную задачу стационарного теплового поля. Переход к двухмерной задаче от реального трехмерного тела соединителя связан со значительным упрощением проблемы нахождения ряда параметров, характеризующих материал диэлектрика, а также граничные условия задачи.

В данном случае распределение температурных полей и их конкретных величин определялось в наиболее температурно нагруженном сечении соединителя (рис. 3).

Для упрощения дальнейших расчетов сделаем следующие допущения, которые не повлияют в значительной степени на конечный результат:

1. Контактную пару «гнездо-штырь» считаем сплошным металлическим стержнем, на котором при пропускании через него электрического тока выделяется определенная мощность в виде тепла ( $P = I^2 \times R_{\text{конт}}$ ).

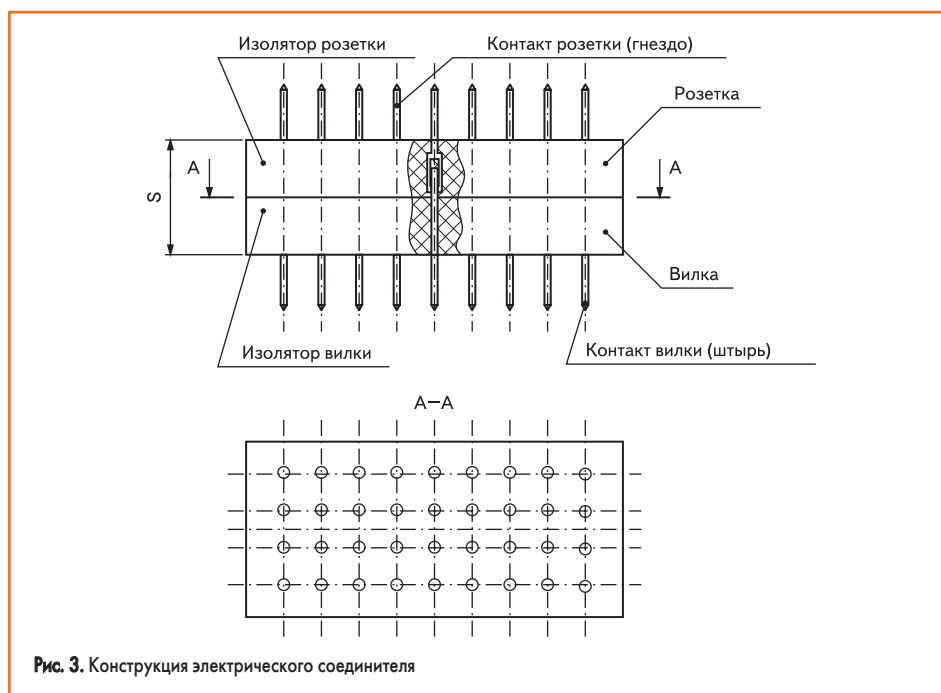


Рис. 3. Конструкция электрического соединителя

2. Изолятор соединителя считаем цельным и однородным.
3. Считаем, что контакты плотно прилегают к изолятору.
4. Коэффициент теплопередачи от металла (контакта) к пластмассе (изолятору) принимаем равным постоянной величине, не зависящей от разности температур между металлом и пластмассой.
5. Коэффициенты теплопередачи от пластмассового изолятора и хвостовиков контактов в окружающую среду (в большинстве случаев это воздух) принимаем равными постоянным величинам.
6. Температуру окружающей среды считаем постоянной и не изменяющейся из-за рассеивания определенного количества тепла от электрического соединителя.

На основании этих допущений разработан программный модуль, реализующий задачу теплопроводности МКЭ.

Созданная программа производит разбиение области на треугольные элементы (триангуляцию) с задаваемой степенью дискретизации. Примеры разбиения площади сечения электрического соединителя представлены на рис. 4.

На процедуру триангуляции в нашем случае наложено следующее ограничение: по используемой методике место расположения контактов в изоляторе обязательно необходи-

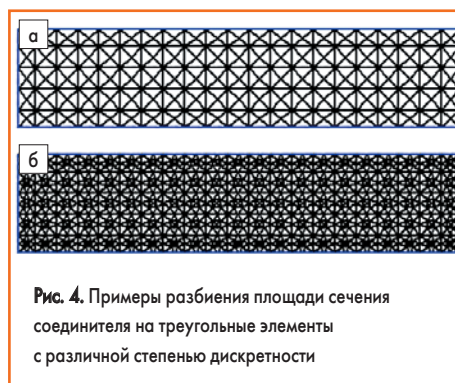


Рис. 4. Примеры разбиения площади сечения соединителя на треугольные элементы с различной степенью дискретности

мо поместить в узел сетки. В связи с геометрической простотой дискретизируемых областей использовался метод разбиения, основанный на выделении прямоугольников по сетке размещения контактов в изоляторе и последующем их разбиении на треугольники с заданной степенью дискретизации. Затем применялся метод нормализации элементов, то есть производилось преобразование треугольников с приближением их формы к наиболее правильной — к равносторонним треугольникам.

После выполнения разбиения области составляют матрицу теплопроводности и вектор узловых нагрузок.

Их формирование широко освещено в литературе [4–6]. Далее систему линейных алгебраических уравнений (12) решают любым из известных методов, в нашем случае применялись модифицированный метод Гаусса и метод градиентного спуска. Затем находят вектор узловых температур.

Очень важным моментом в применяемой методике нахождения температурных полей является учет граничных условий. А конкретно рассматривались два вида граничных условий:

1. Конвективный теплообмен с внешней средой, то есть отдача тепла электрическим соединителем в окружающую среду, через боковые и торцевые грани его изолятора.

Тепловой поток, теряемый за счет конвекции, ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ):

$$q = h \times (T - T_{\infty}), \quad (13)$$

где  $h$  — коэффициент теплоотдачи,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$ , он зависит от большого числа факторов (при естественной конвекции на воздухе его рекомендованное значение равняется  $15 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$  [10]);  $T$  — температура точки боковой грани изолятора, °С;  $T_{\infty}$  — температура окружающей среды, °С.

Учет конвективного теплообмена ведут, добавляя соответствующие выражения к компо-

нентам матрицы теплопроводности и вектора нагрузок, соответствующих граничным узлам [6].

2. Точечный источник тепла в узлах соответствующих контактов.

Как уже отмечалось ранее, полное количество тепла, генерируемое одной контактной парой (штырь-гнездо) электрического соединителя, при прохождении через нее электрического тока, определяется выражением (Вт):

$$Q_{\text{конт.}} = I^2 \times R_{\text{к}}, \quad (14)$$

где  $I$  — сила тока, проходящего через контактную пару, А;  $R_{\text{к}}$  — полное сопротивление контакта (омическое сопротивление контактных электродов плюс переходное сопротивление), Ом.

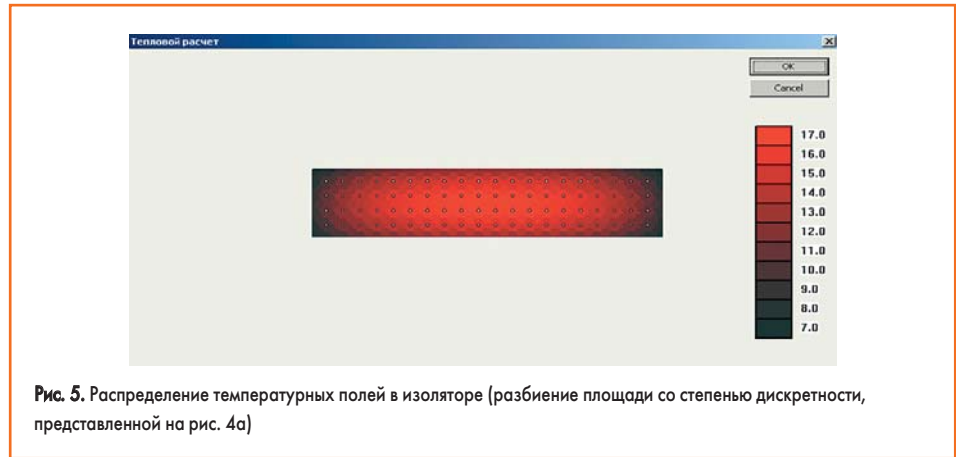
На данном этапе работы величина сопротивления контактной пары использовалась как заданное значение, в дальнейшем же предполагается этот параметр определять расчетным методом по формулам, основанным на работах Герца, Хольма и др.

Для приведения этого выражения применительно к принятому двумерному упрощению эта зависимость будет выглядеть так:

$$Q = Q_{\text{конт.}} / S \times \eta, \quad (15)$$

где  $S$  — толщина соединителя (расстояние между плоскостями, на которых располагаются хвостовики контактов), мм;  $\eta$  — безразмерный коэффициент, характеризующий, какая часть выделенного контактной парой тепла рассеивается в окружающую среду через боковые грани соединителя (остальная часть тепловой энергии отводится через хвостовики контактов и присоединенные к ним провода, а также через торцевые грани соединителя). Коэффициент определяется эмпирически для каждого типа контактной пары. В данном случае для ножевой контактной пары (плоский штырь — плоское гнездо) было установлено, что  $\eta = 0,52$ . Для этого была проведена серия экспериментов, в результате которой и была определена величина коэффициента.

Предстоит серьезная работа по созданию методологии определения коэффициента  $\eta$ , как экспериментальной, так и теоретической его составляющих:



**Рис. 5.** Распределение температурных полей в изоляторе (разбиение площади со степенью дискретности, представленной на рис. 4а)

$$\eta = \eta_1 \times \eta_2, \quad (16)$$

где  $\eta_1$  — коэффициент, учитывающий экспериментальную составляющую коэффициента  $\eta$ ;  $\eta_2$  — уточняющий коэффициент для экспериментальной составляющей коэффициента  $\eta$ . Что здесь имеется в виду?

1. Определение экспериментальной составляющей коэффициента  $\eta$  для основных типов контактных пар, таких как плоские (ножевые), цилиндрические, гиперболоидные, комбинированные и др.
2. Создание методики расчета уточняющего коэффициента  $\eta_2$  для экспериментальной составляющей коэффициента  $\eta$ , в зависимости от изменения основных характеристик контактной пары (размеров, материала контактных электродов и их покрытия, усилий контактного давления и т. д.).

Величина  $Q$  добавляется к вектору нагрузки, точнее к его компоненте, которая соответствует глобальной степени свободы, отнесенной к данному узлу.

Разработанный модуль позволяет рассчитывать температурное поле, которое устанавливается в наиболее температурно нагруженном сечении соединителя. Если температуру окружающей среды принять за нулевую отметку (температура среды равна 0), то результат расчета следует считать перегревом соединителя — разницей между температурой точки соединителя и температурой окружающей среды.

Результаты работы программного модуля, реализующего задачу теплопроводности МКЭ, представлены на рис. 5 и 6. Показаны и резуль-

таты расчета для одного и того же случая, но с разной степенью дискретизации рабочей области, соответственно конечно-элементным сеткам, изображенным на рис. 4.

В данном примере электрический соединитель нагружался электрическим током равномерно (сила тока на каждый контакт соединителя составляла 1 А).

Здесь и далее на рисунках приведена температура перегрева. Как и следовало ожидать, при равномерной токовой нагрузке соединителя наиболее нагретой частью является центр этого устройства, о чем свидетельствует цветовая гамма результата.

После анализа результатов расчета температурного поля электрического соединителя и графического изображения его распределения появляется возможность корректировки схемы токового нагружения. В областях с критическими температурами необходимо снижать токовые нагрузки на контакты, и наоборот — в областях с пониженными температурами перегрева их увеличивать. Такая корректировка схемы нагружения с учетом конкретных условий позволяет обеспечить равномерную токовую нагрузку по всему соединителю. На рис. 7 представлена картина температурных полей с учетом корректировки схемы токового нагружения контактов.

Результатом анализа конкретного соединителя в конечном счете является оценка его пригодности к работе в заданных условиях — с точки зрения температурного режима эксплуатации. Разработанный метод определения фактических температур в соединителе показал достаточную точность предска-



**Рис. 6.** Распределение температурных полей в изоляторе (разбиение площади со степенью дискретности, представленной на рис. 4б)



**Рис. 7.** Распределение температурных полей в изоляторе с откорректированной токовой нагрузкой

мого режима работы. Погрешность максимальных температур, определенных расчетным путем на стадии проектирования с использованием данного метода, не превышает 8–10% от реальных инструментальных замеров, полученных на натуральных образцах соединителей.

По мнению авторов, такие результаты, достигнутые на этапе разработки, позволяют применять данную методику при проектировании новых типов конструкций электрических соединителей.

### Заключение

Обеспечение оптимального теплового режима эксплуатации электрических соединителей — необходимое условие его нормального функционирования и обеспечения заявленных технических параметров в течение заданного срока эксплуатации.

Существующий сейчас способ определения тепловой нагрузки на электрические соединители, который официально закреплен в нормативно-технической документации (НТД), сводится к точечным замерам температуры перегрева контактов. Он не учитывает взаимного влияния температурных полей, возникающих при одновременном нагреве всех контактных пар, находящихся в соединителе, и тепловых процессов, протекающих в изоляторе, а позволяет делать лишь косвенную оценку состояния соединителя с достаточно большой степенью погрешности.

Разработанный программный модуль определения температурных полей и фактических значений температур в любой точке сечения соединителя позволяет конструктору уже на стадии разработки производить необходимые корректировки токовых нагрузок на конкретные контактные пары, с целью обеспечения равномерной тепловой нагрузки по всему сечению соединителя и максимальной пропускной суммарной мощности.

Дальнейшим развитием созданного программного модуля расчета температурных полей должна стать его модернизация и возможность использования при расчете не только температурно нагруженных сечений или изделий, представляющих собой плоские модели, но и реальных устройств в трехмерном пространстве. Создание такого модуля позволит перейти к более объективной оценке за счет сокращения количества применяемых допущений при назначении граничных условий.

### Литература

1. Хольм Р. Электрические контакты. М.: Издательство иностранной литературы, 1961.
2. Мельников С. И. Технология производства электрических соединителей. М.: Энергия, 1979.
3. Левин А. П. Контакты электрических соединителей радиоэлектронной аппаратуры (расчет и конструирование). М.: Советское радио, 1972.
4. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975.
5. Галлагер Р. Метод конечных элементов. М.: Мир, 1984.
6. Сергерлинд Л. Применение метода конечных элементов. М.: Мир, 1979.
7. Сафонов Л., Сафонов А. Электрические прямоугольные соединители. Анализ физических процессов, происходящих в контакте // Компоненты и технологии. 2007. № 7.
8. Сафонов Л., Сафонов А. Электрические прямоугольные соединители. Рекомендации по практическому применению в РЭА // Технологии в электронной промышленности. 2007. № 5.
9. Фокин В. М., Бойков Г. П., Видин Ю. В. Основы технической теплофизики. М.: Издательство иностранной литературы, 2004.
10. Лариков Н. Н. Теплотехника: Учеб. для вузов. М.: Стройиздат, 1985.
11. Шаманов Н., Носов И., Пивоваров В. Прямоугольные соединители ФГУП «Карачевский завод «Электродеталь» // Электронные компоненты. 2003. № 1.
12. Белоусов А. К., Савченко В. С. Электрические разъемные контакты в радиоэлектронной аппаратуре. М.: Энергия, 1975.
13. Сафонов Л., Сафонов А. Электрические прямоугольные соединители. Электролитическое получение серебряных и золотых покрытий повышенной твердости и износоустойчивости // Технологии в электронной промышленности. 2007. № 7.