

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НАГРЕВА КОНТАКТНОЙ СЕТИ В ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧАХ И В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ**

Нагрев проводов и зажимов контактной сети представляет собой сложный пространственно неравномерный и значительно изменяющийся во времени процесс, зависящий от множества факторов. Достаточно точно качественно и количественно оценить этот процесс можно либо экспериментальным путём, либо моделированием. Эксперимент в силу большой пространственной неравномерности и временной зависимости также представляет собой сложность. Умение расчётным путём достаточно точно оценивать нагрев контактной сети представляет собой важную практическую инженерную задачу. Объяснить процесс нагрева и его значимость для контактной сети студентам является не менее важной образовательной задачей, поскольку на производстве подготовленный специалист должен понимать качественно происходящие процессы и принимать соответствующие технологические решения.

Для организации технического обслуживания контактной сети по состоянию необходимо создавать методы прогнозирования срока службы её элементов. Основными элементами, определяющими надёжность контактной сети, являются контактные и другие токоведущие провода, а также зажимы. Одним из основных факторов, влияющих на старение этих элементов, является температура. В данном случае, под старением проводов и зажимов контактной сети понимается ухудшение их механических и электрических характеристик при воздействии температуры, особенно совместно с механической нагрузкой (статической от натяжения проводов и динамической от воздействия токоприёмника и ветра). Это вызвано рекристаллизационным отжигом, вследствие чего изменяется первичная текстура провода, преимущественная ориентация и размеры дендритов металла, т.е. снимается нагортовка и уменьшается механическое допустимое временное сопротивление. В зависимости от величины и продолжительности действия температуры различают три вида отказов: полный пережог, отжиг или долговременное разупрочнение (тепловое старение) провода. Увеличение электрического

сопротивления, в основном, касается токопроводящих зажимов, что связано с увеличением переходного сопротивления зажим – провод в результате циклов нагрева и остывания. Таким образом, знание зависимости температуры проводов и зажимов контактной сети от времени необходимо для прогноза их механического и электрического ресурса на период жизненного цикла.

Температура проводов и зажимов контактной сети определяется несколькими различными источниками нагрева и охлаждения, а также теплофизическими параметрами самих проводов и зажимов. Источниками нагрева являются:

- резистивный нагрев от собственного электрического сопротивления проводов и зажимов, от переходных сопротивлений зажим – провод и токосъёмная накладка токоприёмника – контактный провод при протекании транзитных тяговых токов поперечного и продольного направления;

- нагрев проводов и зажимов от солнечной радиации;

- нагрев контактного провода от кондуктивной теплопередачи при контакте с токосъёмной накладкой токоприёмника.

Охлаждение проводов и зажимов осуществляется с помощью:

- конвективного охлаждения воздухом;

- охлаждение лучеиспусканием;

- охлаждения за счёт кондуктивной теплопередачи при механическом контакте проводов с нетоковедущими элементами контактной сети.

В настоящее время в существующих методиках расчёта /1/ и/2/ учитывается нагрев от собственного сопротивления проводов при протекании транзитных тяговых токов и нагрев от солнечной радиации, а охлаждение – за счёт конвекции и излучения. В этих методиках на основании уравнения теплового баланса при данных тепловых параметрах провода, параметрах конвективного охлаждения, охлаждения лучеиспусканием, параметрах нагрева от солнечной радиации и зависимости тока в проводе от времени выводится уравнение зависимости температуры провода от времени. При этом температура провода по всей длине и поперечному сечению предполагается одинаковой, т.е. нет возможности учесть неравномерность нагрева по длине, вызванную локальными нагревами в зажимах, от токоприёмника или неравномерным охлаждением. О неравномерности нагрева проводов контактной сети по длине и поперечному сечению в эксплуатации имеется данные экспериментальных исследований приведённые в литературе /2/ и /3/. По этой же причине, не совсем корректно учитывается неравномерность нагрева проводов по длине, вызванная перераспределением токов между

контактным проводом, несущим тороидом и усиливающим проводом на двух смежных участках контактной сети, разделённых электросоединителем, во время прохождения токоприёмника ЭПС двум этим участкам.

В разрабатываемой в УрГУПС методике расчёта температуры проводов и зажимов контактной сети учитываются все указанные выше источники нагрева и охлаждения. Для этого последовательно составляется и рассчитывается несколько математических моделей методом конечных элементов. Эти модели имеют разную пространственную размерность, что связано с пространственно-геометрическими характеристиками исследуемого объекта (проводов и зажимов контактной сети). Для каждой такой модели в специальной форме записывается уравнение нестационарного теплообмена с необходимыми начальными и граничными условиями, которые могут быть заданы в виде различных зависимостей от времени, температуры или других параметров. Исходными данными для этих моделей являются теплофизические и пространственно-геометрические параметры зажимов и проводов, условия окружающей среды, влияющие тепловые процессы, а также токи во всех элементах контактной сети в любой момент времени. Значения токов могут быть получены путём имитационного моделирования работы системы электроснабжения, с последующим расчётом токораспределения транзитного тягового тока между всеми проводами контактной сети.

На первичных двумерных моделях определяется температурное поле для поперечного сечения проводов и зажимов. Математическая модель реализована в специализированном программном комплексе для моделирования мультифизических процессов на основе метода конечных элементов Comsol Multiphysics. На его основе путём интегрирования рассчитываются параметры охлаждения проводов и зажимов за счёт конвекции и лучеиспускания, а также параметры резистивного нагрева и нагрева от солнечной радиации, которые приводятся к единице длины. Пример расчёта температурного поля при охлаждении провода МФ-100 конвекцией приведён на *рис. 1*, а излучением на *рис. 2*.

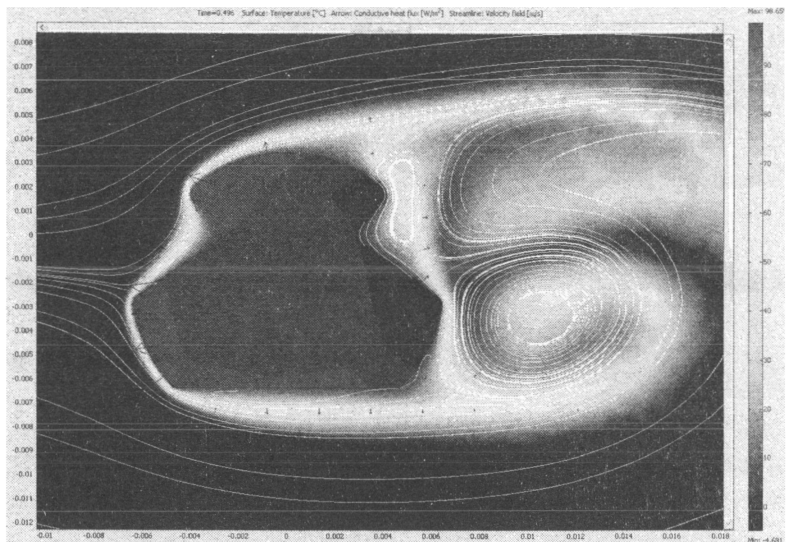


Рис. 1. Конвективное охлаждение изношенного провода МФ-100

Цветом на рисунке 1 показано поле температуры в  $^{\circ}\text{C}$ , чёрными стрелками обозначен кондуктивный поток тепла, белые линии – линии тока вектора скорости воздушного потока

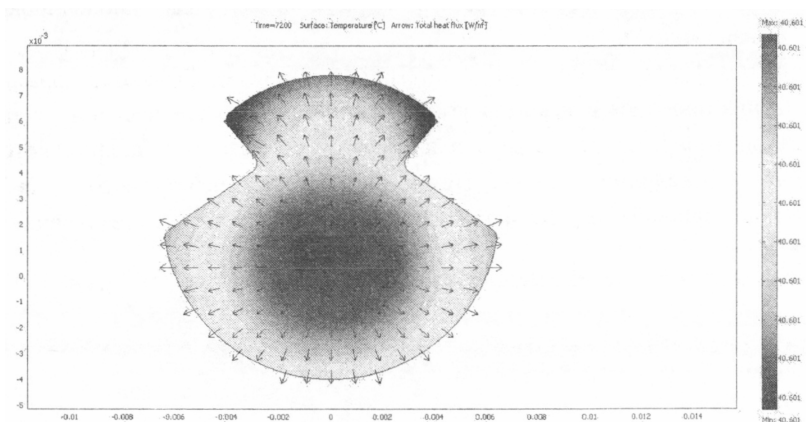


Рис. 2. Охлаждение неизношенного провода МФ-100 лучепусканием

Цветом на рисунке 2 показано поле температуры в °С, чёрными стрелками обозначен кондуктивный поток тепла.

Далее эти параметры передаются в топологически линейную математическую модель, в которой контактная сеть представляется в виде графа: провода – ветви графа, зажимы – узлы графа. Здесь определение температуры происходит по длине проводов. Резистивный и кондуктивный нагрев контактного провода от полоза токоприёмника определяется с помощью дополнительной трёх- и двухмерной модели (см. *рис. 3*. ниже).

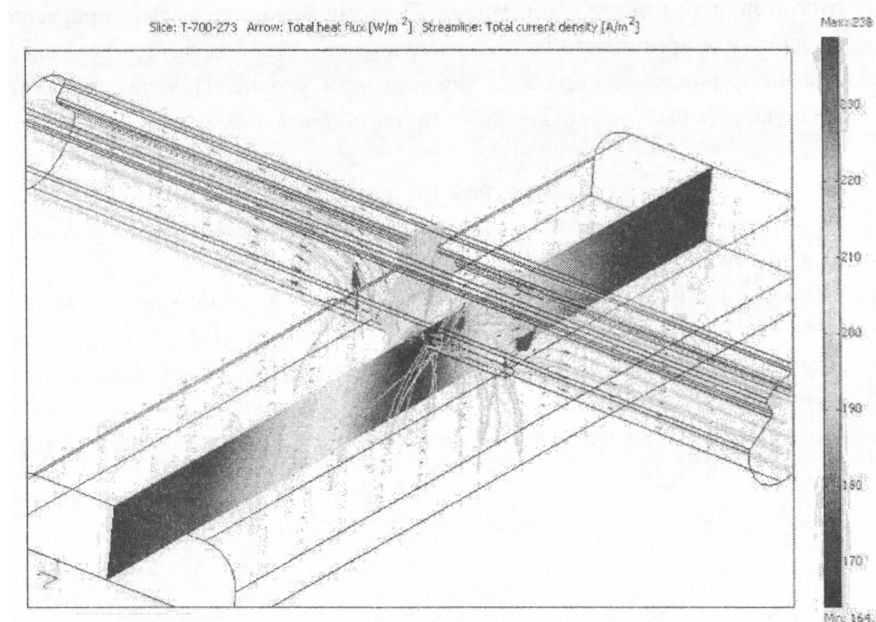


Рис. 3. Нагрев провода МФ-100 при статичном контакте с угольной токосъёмной пластиной токоприёмника при токе 1000 А

Цветом показано поле температуры в °С, красными стрелками обозначен поток тепла, зелёными линиями плотность электрического тока.

Из *рис. 3*. видно, что при статичном контакте с токосъёмной пластиной нагрев контактного провода по сечению уже неравномерен: в нижней его части температура существенно больше, чем в верхней. Таким образом, предлагаемая методика позволит определить, как изменяется температура проводов и

зажимов, как по длине, так и по сечению при действии всех указанных выше факторов.

Разработанная методика с применением математического моделирования на основе метода конечных элементов позволяет получить новые знания о процессах, происходящих в тяговой сети. Эти знания кроме непосредственного прикладного назначения, могут и должны использоваться в учебном процессе при подготовке специалистов в области электроснабжения транспорта. Методика имеет широкие возможности графического представления результатов, в том числе с анимацией. Поэтому можно визуально проследить, как в динамике протекают процессы нагрева контактной сети. Это полезно для понимания данных процессов на качественном уровне. Получить подобную наглядную информацию, каким-либо другим образом весьма затруднительно.

### **Библиографический список**

- 1. Марквардт К.Г. Контактная сеть. Учебник для вузов ж.-д. трансп. Изд. 4-е, перераб. и доп. – М.: «Транспорт», 1994.–335 с.*
- 2. Kießling F., Puschmann R., Schmieder A., Schmidt P.: Fahrleitung elektrischer Bahnen: Planung, Berechnung, Ausführung - 2., überarbeitete Auflage. B. G. Teubner Leipzig; Stuttgart 1998*
- 3. Берент В.Я. Материалы и свойства электрических контактов в устройствах железнодорожного транспорта – М.: Интекст. 2005. – С. 408*