

Ж. К. Бегалиев

Распределения тока в контактном проводе при токосъеме

((Казакская академия транспорта и коммуникации, г. Алматы, Казахстан))

В этой статье определение поля плотности тока при токосъеме сводилось только к расчету теплового (резистивного) действия электрического тока. В эти методики обязательно необходимо включать учет изгибной жесткости контактных проводов для расчета распределения силы нажатия на контактный провод между токосъемными пластинами. Поэтому необходимо совершенствовать существующие методики расчета динамики механического взаимодействия токоприемника с цепной подвеской.

В процессе токосъема внутри полоза и на участке контактного провода, непосредственно связанного с ползцом, происходит постоянное изменение распределения плотности электрического тока. Это изменение связано с величиной тока, потребляемого ЭПС, переходным сопротивлением подвижного электрического контакта токосъемная пластина - контактный провод, расположением контактного провода на ползце токоприемника.

В этой статье определение поля плотности тока при токосъеме сводилось только к расчету теплового (резистивного) действия электрического тока. Электромагнитные поля, электроэрозионные процессы, возникающие при токосъеме, в данном случае не рассматривались и не учитывались. Исходными данными являются параметры контактного провода и полоза, значения тока, потребляемого ЭПС, сила нажатия полоза токоприемника на токосъемные пластины. Основным критерием качества токосъема принято считать силу нажатия токоприемника на контактный провод [1]. Поэтому необходимо определить, как она влияет на распределение поля плотности тока и вызываемого этим полем нагрева зоны перехода контактный провод- полз токоприемника.

В данной статье рассматривается полз проекта ПКБ ЦТ №3.115.71.11.00 с тремя рядами металлокерамических пластин ВЖЗП, контактный провод марки 2МФ-100 с небольшим (1 мм по высоте) равномерным износом. Внешний вид полоза данного полоза [1] с контактным проводом и эквивалентной электрической схемой приведен на рис. 1. Делается допущение, что двойной контактный провод рассматривается как один проводник с током.

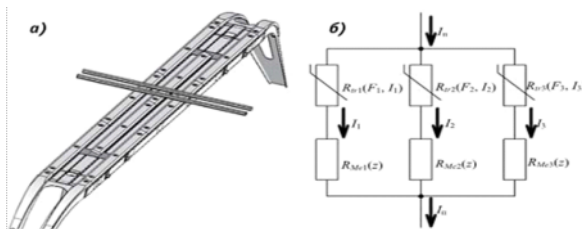


Рисунок 1 - внешний вид полоза с контактным проводом (а) и эквивалентная электрическая схема (б)

На эквивалентной электрической схеме на рис. 1(б) обозначены следующие элементы: $R_{T_{ri}}$ - переходное сопротивление i -я пластина - контактный провод; R_{Mc_i} - собственное сопротивление полоза относительно i -й пластины; I_i - ток, протекающий из контактного провода в полз через i -ю пластину. В общем случае переходное сопротивление $R_{T_{ri}}$ (токосъемная пластина - контактный провод) зависит от их марок, состояния поверхностей, силы нажатия пластины полоза на провод F_i , значения тока I_i протекающего через данное переходное сопротивление, и его температуры [2,3]. В данном случае принято допущение, что переходное сопротивление $R_{T_{ri}}$ является нелинейным элементом, зависящим только от I_i и F_i . Влияние температуры, качество обработки рабочих поверхностей провода и пластин не учитывается. Зависимость $R_{T_r} = R_{T_r}(F, I)$ для пластин ВЖЗП была аппроксимирована по данным результатов экспериментов, приведенных в литературе [2]. Аппроксимация задана следующим алгебраическим выражением, предложенным одним из авторов,

$$R_{T_r}(I, F) = R_{T_{r\infty}}(F) \cdot \psi(I) \quad (1)$$

где $R_{T_{r\infty}}$ - предельное значение переходного сопротивления при токе, стремящемся к бесконечности, Ом; $\psi(I)$ - коэффициент увеличения предельного переходного сопротивления при малых значениях тока.

Графики функций $R_{T_{\infty}}(F)$ и $\psi(I)$ показаны на рис. 2.

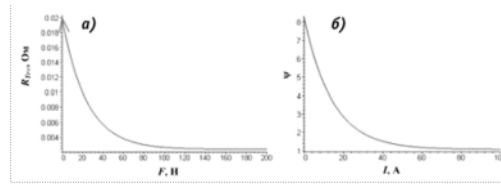


Рисунок 2 Графики функций: (а) $R_r(F)$ и (б)

Принято считать, что величина переходного сопротивления R_{T_r} обратно пропорциональна силе нажатия контактов F [3, 4]. Поэтому график зависимости $R_{T_t} = R_{T_t}(F)$ представляет собой гиперболу, и при $F=0$ переходное сопротивление $R_{T_r} = \infty$. В рассматриваемом случае считается, что при нажатии $F=0$ возникает дуга, имеющая конечное омическое сопротивление.

Собственное сопротивление полоза относительно каждой пластины R_{M_e} зависит от расположения проводов на полозе. Из-за зигзага контактный провод постоянно перемещается по полозу. Если предположить, что электровоз движется на прямом участке пути, то центр полоза будет находиться над осью пути. В этом случае за параметр, характеризующий положение контактного провода на полозе, удобно брать расстояние z от центра полоза до провода (делается допущение, что контактный провод параллелен оси пути). График z вдоль пути представляет собой пилообразную кривую. Максимумы и минимумы z совпадают по координате абсцисс с координатами опор, а сам параметр z при этом равен либо положительному зигзагу 0,3 м, либо отрицательному - 0,3 м.

Составим систему уравнений для эквивалентной электрической схемы (см. рис. 1а):

$$\begin{cases} R_{tr1}(F_1, I_1) + R_{Me1}(z) \cdot I_1 = [R_{Tr2}(F_2, I_2)] \cdot I_2 \\ R_{tr2}(F_2, I_2) + R_{Me2}(z) \cdot I_2 = [R_{Tr3}(F_3, I_3)] \cdot I \end{cases}$$

$$I_1 + I_2 + I_3 = I_t \quad (2)$$

где I_t - полное значение тока, потребляемое полозом, А.

Для моделирования электрических процессов непосредственно по всему объему контактного провода и полоза используется программный комплекс Comsol Multiphysics 3.5a, основанный на принципе конечных элементов [5]. Для описания течения электрического тока внутри токоведущих частей полоза и провода используется уравнение непрерывности (закон Ома в дифференциальной форме) для стационарных токов [6]

$$-\Delta \cdot \Delta V = 0 \quad (3)$$

где V - потенциал. В; y - удельная проводимость См/м; Δ - оператор градиента. После решения уравнения (3) определяется вектор напряженности электрического поля, В/м,

$$E = -\Delta V \quad (4)$$

Далее вычисляется вектор плотности электрического тока, А/мг,

$$j = \cdot E \quad (5)$$

Объемная плотность резистивного нагрева Q_{M_e} зависит от плотности тока и определяется по формуле, Вт/м³,

$$Q_{M_e} = j^2 \cdot r \quad (6)$$

где r - удельное электрическое сопротивление материала, Ом-м.

В модели задается геометрия токоведущих частей указанного полоза с контактным проводом, который расположен на нем с определенным значением z (рис. 3), а также удельные проводимости всех элементов a , взятые при температуре 0 °С.

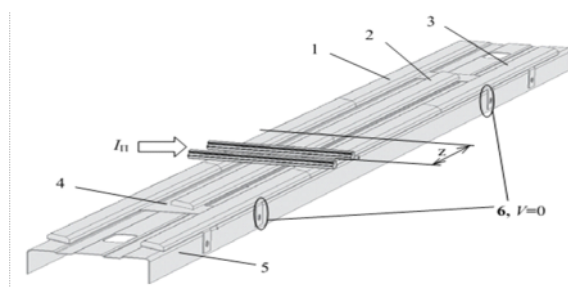


Рисунок 3 - Геометрия модели протекания тока внутри токоведущих частей полоза с граничными условиями

На рис. 3 обозначены следующие элементы: 1,2,3 - соответственно первый, второй, третий ряд токосъемных пластин ВЖЗП; 4 - медная подложка; 5 - железное основание полоза; 6 - место подключения токоотводящих проводников. Здесь задано граничное условие $V=0$. С левой стороны на торцах контактного провода задана нормальная плотность тока (одностороннее питание), которая соответствует полному току полоза $jt = It/S_{kt}$ где S_{kt} - поперечное сечение контактного провода. На всех остальных внешних границах задается условие равенства нормального значения плотности тока нулю $j_t = 0$. На внутренних границах принято граничное условие "непрерывность", означающее равенство нормальной плотности тока с одной и с другой стороны от границы в каждой точке. Для расчета значения собственных сопротивлений RM_{ei} принято допущение, что переходные сопротивления пластины ВЖЗП - контактный провод при этом отсутствуют, т. е. $R_{T_{r1}} = R_{T_{r2}} = R_{T_{r3}} = 0$. В модели генерируется сетка, содержащая около 450 тыс. элементов, что соответствует 760 тыс. степеней свободы.

В результате решения уравнений (3) - (6) с заданными параметрами и граничными условиями определяются значения поля потенциала V , напряженности электрического поля E , поля плотности тока j , поля мощности резистивного нагрева Q_{Me} от собственного сопротивления по всему объему полоза и контактного провода. Для параметра $z = -0,15$ м и тока $I_t = 1600$ А результат расчета приведен на рис. 4.

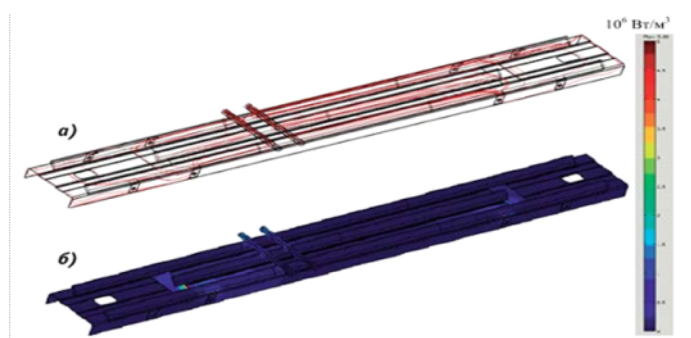


Рисунок 4 - Результат расчета распределения тока внутри полоза и контактного провода без учета переходных сопротивлений контакта при $z = -0,15$ м: а) эпюра линий электрического тока; б) эпюра поля мощности резистивного нагрева Q_{Me} от собственного сопротивления

После расчета распределения тока внутри полоза и провода определяется значение тока, стекающего из контактного провода в каждую из пластин ВЖЗП, I_t . Далее на основании эквивалентной схемы (см. рис. 16) определяются значения собственных сопротивлений полоза относительно каждой пластины RM_{ei} с учетом допущения, что переходные сопротивления равны нулю, т. е. $R_{T_{ri}} = 0$. При одном и том же значении суммарного тока полоза I_t и отсутствии переходных сопротивлений результат расчета будет зависеть только от параметра z (рис. 5).

Из рис. 5 видно, что наибольшие значения собственных сопротивлений полоза относительно каждой из пластин RM_{ei} и наибольший суммарный резистивный нагрев полоза от этих сопротивлений PM_e будут когда контактный провод расположен на середине полоза $z=0$. Наименьшие значения RM_{ei} и PM_e наблюдаются, когда контактный провод смещен от центра полоза на величину зигзага $z = \pm 0,3$ м. Данный результат легко объяснить. Поскольку места

подключения токоотводящих проводников к полозу 6 (см. рис. 3) разнесены в стороны от центра полоза, то при $z = 0$ путь протекания тока по полозу наибольший.

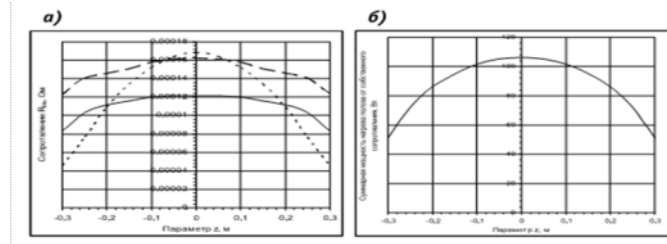


Рисунок 5 - Графики зависимостей от параметра z а) собственного сопротивления R_{Me} полоза относительно каждой пластины ВЖЗП б) суммарной мощности резистивного нагрева полоза P_{Me} от собственного сопротивления

Соответственно сопротивления R_{Mei} и нагрев P_{MeU} также наибольшие. При $z = \pm 0,3$ м ситуация противоположная. Из анализа эпюр полей объемной плотности мощности резистивного нагрева полоза от собственных сопротивлений Q_{Me} при изменении z видно, что мощность нагрева распределена по полозу крайне неравномерно. Значительная ее часть сосредоточена вблизи места подключения токоотводящих проводников. При движении токоприемника объемная плотность мощности резистивного нагрева от собственного сопротивления Q_{Me} будет постоянно перераспределяться внутри полоза в зависимости от параметра z . К тому же переходные сопротивления контактный полоз - пластина ВЖЗП будут перераспределять токи стекающие из контактного провода в каждую из пластин. Это будет влиять на поле объемной плотности резистивного нагрева от собственного сопротивления внутри полоза. Постоянное изменение этого поля Q_{Me} внутри полоза во времени в зависимости от параметра z и переходных сопротивлений R_{Tr_i} очень сильно повышает время расчета и требует увеличения вычислительной мощности ЭВМ. Поэтому поле объемной плотности резистивного нагрева от собственного сопротивления Q_{Me} внутри полоза было усреднено относительно z и взято стационарным $Q_{Me_{cp}}(t) = const$. После того как определены значения собственных сопротивлений полоза относительно каждой из пластин R_{Tr_i} , можно из системы уравнений (2) рассчитать величины токов I_i снимаемых с контактного провода каждой пластиной, и значения переходных сопротивлений R_{Tr_i} . Для этого надо задаться значениями сил нажатия токосъемных пластин на контактный провод F . Значения силы нажатия всего полоза (сумма сил нажатия всех пластин) на контактный провод были получены моделированием процесса динамики механического взаимодействия токоприемника с контактной подвеской с заданными исходными данными. Описание этой модели приведено в [7]. Данная модель не учитывает распределения нажатия по пластинам. Для того чтобы это сделать, надо обязательно учесть изгибную жесткость контактного провода. Поэтому результаты расчета силы нажатия всего полоза токоприемника из указанной выше модели были пересчитаны на нажатие каждой отдельной пластины на контактный провод с учетом его изгибной жесткости. Методика учета изгибной жесткости контактного провода при расчете динамики взаимодействия контактной подвески с токоприемником изложена в [8]. Значение силы нажатия F_i контактного провода на первую пластину показано на рис. 6.

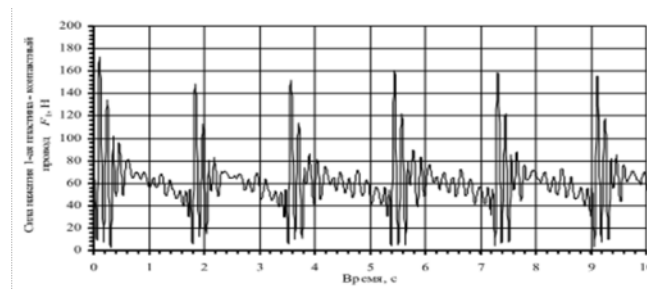


Рисунок 6 - График зависимости силы F_i , нажатия контактного провода на первую пластину ВЖЗП от времени для первых 10 с

Мощность нагрева в переходном сопротивлении i -я токосъемная пластина - контактный провод находится по закону Джоуля - Ленца

$$P_{T_{ri}} = I_i^2 \cdot R_{T_{ri}} \quad (7)$$

Результат расчета системы уравнений (2) показан на рис. 7 в виде графиков зависимостей $R_{T_r}(t)$, $I_t(t)$ и $P_{T_{ri}}(t)$. Графики зависимостей данных величин для второй и третьей токосъемной пластины будут иметь похожий вид.

Распределение поля Q_{Me} объемной плотности резистивного нагрева от собственного сопротивления внутри контактного провода зависит от распределения поля плотности тока j . Вдали от полоза плотность тока j по поперечному сечению контактного провода распределена равномерно. На расстоянии примерно 10 см от первой пластины полоза электрический ток начинает стекать из всего объема контактного провода к участкам на рабочей поверхности, которые соприкасаются с токосъемными пластинами. Поэтому в непосредственной близости от полоза поле резистивного нагрева Q_{Me} , вызванное собственным сопротивлением контактного провода, распределено внутри него неравномерно. Данное поле Q_{Me} нестатично, и зависит от величины токов, снимаемых каждой пластиной I_t . На рис. 8 представлено распределение плотности тока j и объемной плотности резистивного нагрева от собственного сопротивления Q_{Me} внутри контактного провода. Результат, приведенный на рис. 8, получен из условия, что ток, снимаемый каждой пластиной ВЖЗП, в данном случае равен среднему значению тока во времени $I_i = I_i$, который снимает данная пластина при изменении нажатия во времени. Иными словами, поле Q_{Me} на рис. 8 получается усредненным по значению токов I_i . Аналогично случаю с ползком изменяющееся во времени поле $Q_{Me}(t)$ заменяется данным стационарным усредненным полем $Q_{Me}(t) = nst$.

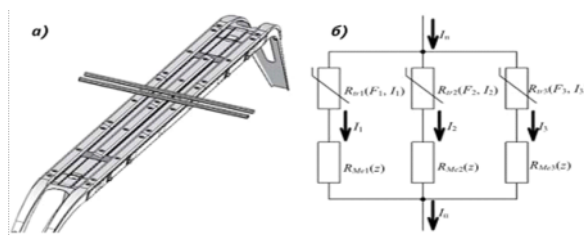


Рисунок 7 - Графины зависимостей от времени для первых 10 с: а) переходного сопротивления контактный провод - первая пластина $R_{T_{ri}}$; б) тока, снимаемого первой пластиной I_i ; в) мощности резистивного нагрева $P_{T_{ri}}$ в данном переходном сопротивлении $R_{T_{ri}}$

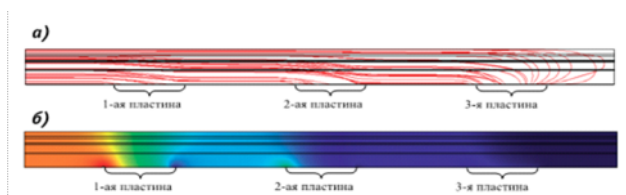


Рисунок 8 - Эпюра распределения линий плотности тока j в контактный провод (а) и эпюра поля Q_{Me} объемной плотности мощности резистивного нагрева от собственного сопротивления (б)

Из графиков на рис. 7 видно, что переходные сопротивления контактный провод - токосъемная пластина R_{T_r} , зависящие от силы нажатия пластины на контактный провод, превышают значения собственных сопротивлений полоза R_{Mei} относительно пластин более чем на порядок. Соответственно резистивные мощности в переходных сопротивлениях превышают резистивную мощность внутри полоза от собственного сопротивления.

Выводы:

После анализа влияния на токораспределение по пластинам сил их нажатия на контактный провод можно сделать вывод, что чем более равномерно распределено нажатие, тем более

равномерно распределена токовая нагрузка между пластинами. Если нажатие распределено между пластинами неравномерно, то на пластину с большим нажатием приходится большая часть тока ЭПС, а на пластину с меньшим нажатием - соответственно меньшая. Таким образом, распределение силы нажатия полоза токоприемника на контактный провод между токосъемными пластинами играет первостепенную роль в распределении тока в контактном проводе и полозе при токосъеме и в вызываемом этим распределением резистивном нагреве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Купцов Ю.Е. Увеличение срока службы контактного провода. М.: Транспорт, 1972.- С. 1-160.
2. Верент В.Я. Материалы и свойства электрических контактов в устройствах железнодорожного транспорта. М.: Интекст, 2005.- 408 с.
3. Хольм Р. Электрические контакты. М.: Изд-во иностранной литературы, 1961. 464 с.
4. Электротехнический справочник в 3-х т. Т.2. Электротехнические устройства / Под общ. ред. проф. МЭИ В.Г. Герасимова, П.Г. Грудинского, Л.А. Жукова и др. М.: Энергоиздат, 1981. - 640 с.
5. Справочная система Comsol Multiphysics 3.5a.
6. Джексон Дж. Классическая электродинамика: Пер. с англ. М.: Мир, 1965.- 703 с.
7. Ефимов А.В., Галкин А.Г., Веселов В.В. Подготовка испытаний КС-200 на компьютерной модели КСТ-УрГУПС// Вестник ВНИИЖТ. 2000. Вып. 4.- С. 32 - 36.
8. Ефимов Д.А. Учет изгибной жесткости контактного провода в моделировании контактной подвески// Транспорт Урала. 2009. №1 (20).- С. 79 - 82.

Бегалиев Ж.К.

Темір жол желілеріндегі тоққабылдағыштардың электроқозғалтқыш құрамының жұмысына талдау

Бұл мақалада тоқалғыштағы тоқтың тығыздық өрісін анықтау электрлі тоқтың жылулық (резистивті) әсеріне ғана сәйкестендірілген. Аталған әдістемелерге міндетті түрде тоқалғыш тілімдер арасындағы түйіспелі сымдарға түсетін күштің таралуын есептеу үшін түйіспелі сымдардың иілгіштік қатаңдығының есепке алынуын енгізу керек. Сондықтан тізбекті салпыншағы бар тоққабылдағыштың механикалық әсер ету динамикасының есептеу әдістерін жетілдіру қажет.

Begaliev Zh. K.

Current distribution in the contact wire for current collection

In this article, the definition of the field current density at Toko renting reduced to the calculation of the thermal (resistive) of the electrical current. These techniques must necessarily involve consideration of the bending stiffness of the contact wires to calculate the distribution of forces clicking on the contact wire between the current collection plates is therefore necessary to improve existing methods of calculating the dynamics of mechanical interaction trolley with chain suspension.

Поступила в редакцию 15.01.11

Рекомендована к печати 31.01.11