

# РАСЧЁТ СТУПЕНЧАТЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ МАГИСТРАЛИ

## CALCULATION OF STEP RESISTANCES FOR HIGH SPEED LINE

**M.V. Shevlyugin**, Dr. Sc. (Engineering), Professor, Head of the "Electric Power Engineering of Transport" Department, Russian University of Transport;

**D.V. Semenova**, Postgraduate student of the "Engineering and Technology of Land Transport" Department, Assistant of the "Electric Power Engineering of Transport" Department, Russian University of Transport;

**A.A. Kulikov**, Postgraduate student of the "Electric Power Engineering of Transport" Department, Russian University of Transport

**М.В. Шевлюгин**, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой Электроэнергетика транспорта, Российский университет транспорта;

**Д.В. Семёнова**, аспирант кафедры Техника и технологии наземного транспорта, ассистент кафедры Электроэнергетика транспорта, Российский университет транспорта;

**А.А. Куликов**, аспирант кафедры Техника и технологии наземного транспорта, ассистент кафедры Электроэнергетика транспорта, Российский университет транспорта

**Аннотация.** Высокоскоростная магистраль при проектировании встречается со множеством проблем, для решения которых необходимо находить наилучшие пути. Одной из таких проблем является перегрев провода контактной сети (КС) при прохождении нейтральной вставки с поднятым токоприёмником. Авторами предлагается устройство изолирующего сопряжения (УИС) КС, которое позволит избежать возникновения электрической дуги.

УИС КС представляет собой набор сопротивлений, изменяющихся к концу участка перед нейтральной вставкой. В ходе исследования различных методов формирования ступенчатых сопротивлений были получены конкретные значения для каждого участка УИС КС, были посчитаны общая длина и количество участков УИС КС. Было проведено исследование УИС КС на перегрев контактного провода по причине попадания большого тока на сопротивления УИС КС.

Итогом работы стал тепловой расчёт условий возникновения разрушения контактного провода из-за перегрева, который позволил найти участок с максимальным нагревом и максимальное изменение температур на каждом участке при движении подвижного состава на разных скоростях: 100 км/ч; 200 км/ч; 300 км/ч; 400 км/ч.

**Ключевые слова:** ступенчатое сопротивление, устройство изолирующего сопряжения, контактная сеть, электрическая дуга, перегрев контактного провода

**Abstract.** A high-speed highway in the design encounters many problems, for which it is necessary to find the best ways. One of these problems is the overheating of the wire of the contact network (CN) when passing through the neutral insert with the current collector raised. The authors propose an insulating connection device of the contact network (ICD CN), which will avoid the occurrence of an electric arc, and, consequently, overheating and subsequent failure of the contact wire.

ICD CN is a set of resistances that change towards the end of the section before the neutral insertion. During the study of various methods of forming step resistances, specific values were obtained for each section of the ICD CN, the total length and number of sections of the ICD CN were calculated. A study of the ICD CN was conducted on the burnout of the contact wire due to the ingress of a large current on the resistances of the ICD CN.

The result of the work was a thermal calculation of the conditions for the destruction of the contact wire due to overheating, which made it possible to find a section with maximum heating and maximum temperature change in each section when moving the rolling stock at different speeds: 100 km/h; 200 km/h; 300 km/h; 400 km/h.

**Key words:** stepped resistances, insulating interface device, contact network, electric arc, overheating of the contact network

*Материал поступил в редакцию 25.05.2023  
Автор, ответственный за переписку: Семёнова Д.В.  
E-mail: semenovadar.ya@mail.ru*

Для прохождения нейтральной вставки необходимо обеспечить безопасную и безотказную работу электрооборудования подвижного состава [1]. Важным этапом является борьба с возникновением электрической дуги, которая способна образовываться в момент потери физического контакта между токосъёмником и контактным проводом. По ПТЭ [2] проход нейтральной вставки (НВ) должен быть с опущенными токоприёмниками, так как в это время может возникнуть короткое замыкание, которое перебросится через полз токоприёмника на нейтральный провод. На сегодняшний момент перспективным направлением развития железнодорожного транспорта является высокоскоростная магистраль (ВСМ), где при разработке контактной сети необходимо учитывать все характеристики постоянного и переменного тока [3, 4]. Так как высокоскоростная магистраль предполагает передвижение подвижных составов (ПС) на высоких скоростях, то появляется проблема, которая заключается в следующем:

1. Рассчитываемая скорость движения ПС перед НВ достигает 400 км/ч. Указанная скорость не позволяет вовремя произвести опускание токосъёмника [5].

2. Невозможность своевременного опускания токоприёмника приводит к возникновению электрической дуги [6] и перегосу контактного провода и возможному ущербу подвижному составу [7].

3. В случае опускания токоприёмника заранее, будет наблюдаться повышенная трата электроэнергии на возврат потерянной скорости [8].

Для решения этой проблемы авторами предлагается устройство изолирующего сопряжения контактной сети (УИС КС) и нейтральной вставки высокоскоростной железной дороги переменного тока [9], где в качестве исполнительного органа защиты от возникновения разрушительной дуги применяются ступенчатые переменные активные сопротивления, включённые в подходящую и отходящую части нейтральной вставки контактной сети. Для повышения эффективности высокоскоростной контактной подвески данное устройство необходимо модернизировать

путём замены громоздких сопротивлений на формирование слоёв ступенчатых сопротивлений нанесением нанокompозитного материала непосредственно на контактный провод. В [10] описывались два устройства: [11] и [12], но они не обладают достаточной надёжностью и необходимыми характеристиками для поставленной задачи.

Для создания УИС КС необходимо задать начальные условия (табл.1).

*Таблица 1  
Начальные условия для создания устройства изолирующего сопряжения контактной сети*

Наименование	Величина	Величина в СИ
$R_{пс}$	270 Ом	
$L_{общ}$	5 м	
$V_{пс1}$	400 км/ч	111,1 м/с
$V_{пс2}$	300 км/ч	83,3 м/с
$V_{пс3}$	200 км/ч	55,6 м/с
$V_{пс4}$	100 км/ч	27,8 м/с
$U_{сеть}$	27,5 кВ	27500 В

Задача: обеспечить плавное снижение тока с помощью участков УИС. Чтобы избежать перегоса КП, нам необходимо 240 участков по 20,8 мм длины и с  $R_n = R(n-1) + del$ , где  $R1 = 2$ ,  $del = 2$  Ом. Тогда на последнем участке получаем общее сопротивление  $R_{общ} = (\sum_{i=1}^{240} Rn_i) + R_{пс} = 58110$  Ом, где  $R_{пс}$  – сопротивление подвижного состава. Именно такое количество сопротивления требуется для снижения начального тока до 0,46 А. График зависимости напряжения от участка представлен на рис. 1.

Как видно на рис. 1, кривая не выходит за границы 2000 В. Это говорит о том, что на каждом участке выполняется условие не превышать напряжение в 2 кВ, чтобы не создавать перегоса провода и избежать электрической дуги.

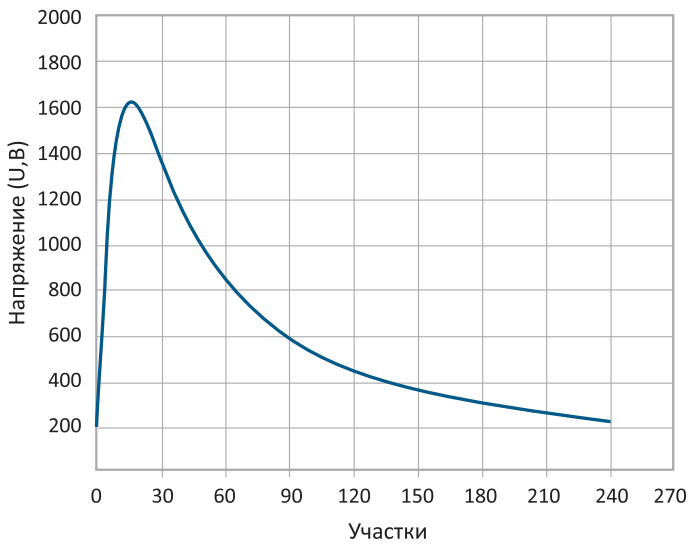


Рис. 1. Зависимость напряжения от номера участка

Так как данное количество участков является слишком большим и неудобным для производства, а также становится трудным процесс тонкой регулировки сопротивления, то необходимо уменьшить количество участков, при этом общая длина изолирующего устройства останется прежней и будет равна  $L_{общ} = 5000$  мм. Соответственно увеличится длина каждого участка. При уменьшении количества участков в 1, 5, 2, 4, 8 или 12 раз – соответственно вырастет длина  $n$ -ого участка, разница в сопротивлении станет более чёткой, что позволит в свою очередь точнее наносить композит на провод. Но у данного метода оптимизации есть недостаток – из-за увеличения сопротивления  $n$ -ого участка растёт падение напряжения на этом участке. Из-за чего максимальное напряжение на начальных участках, когда в сети самый большой ток, возрастает примерно во столько же раз, во сколько было произведено уменьшение участков (рис. 2).

Соответственно, с ростом напряжения растёт мощность, при этом с уменьшением количества участков увеличивается длина  $n$ -ого участка и время преодоления этого участка. Всё это приводит к очень большому количеству теплоты на КП (1), что в свою очередь есть причина плавления контактного провода.

$$Q = P \times t, \quad (1)$$

где  $Q$  – количество теплоты, образующееся на участках,  
 $P$  – мощность,  
 $t$  – время, которое подвижной состав находится на участке  $n$  с мощностью  $P$ .

Основную опасность несут первые 25 % участков, так как пока электропоезд доедет до последнего

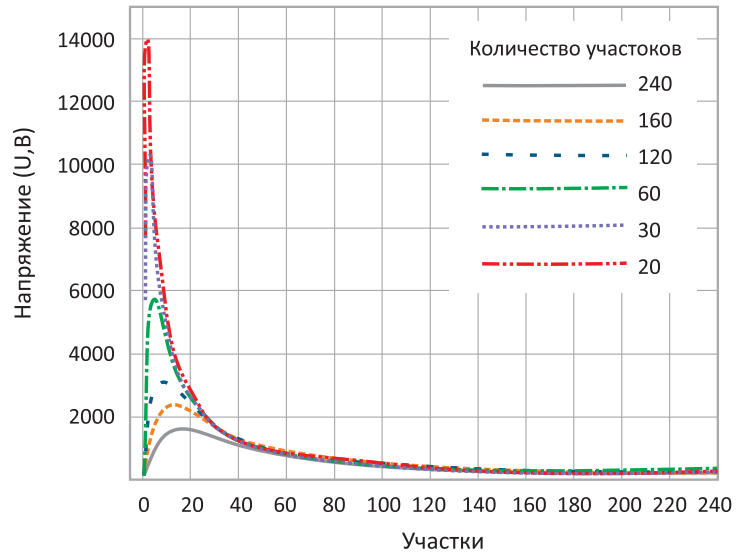


Рис. 2. Зависимость напряжения от разного количества участков

участка – первая четверть УИС КС будет всё это время под нагрузкой, следовательно, греться.

Для устранения скачкообразного характера кривой напряжения можно воспользоваться методом комбинирования вариантов с разным количеством участков. Но из графика на рис. 3 видно, что из-за резкого увеличения суммарного сопротивления на пограничном участке происходит также резкое увеличение напряжения на этом участке, при этом если далее произвести ещё один переход по сокращению количества участков, то подобное увеличение напряжения повторится. Такое поведение напряжения в УИС КС является недопустимым.

Первый вариант включает в себя большое количество участков, но имеет плавный переходный процесс. Второй вариант имеет сильное возрастание напряжения в первой четверти устройства изолирующего сопряжения, но меньшее количество участков. В третьем варианте наблюдаются негативные резкие изменения напряжения между участками в большую сторону при изменении количества участков. Следовательно, все указанные варианты не подходят для расчёта участков УИС КС.

Авторы статьи предлагают изменить входные данные и, произведя преобразование формул, рассчитать необходимые параметры УИС КС.

Чтобы кривая напряжения нас устраивала, необходимо построить её самостоятельно. За основу возьмём первоначальный график на рис. 1, где сопротивления подбирались до момента удовлетворительного тока. Характер кривой – парабола, которая рассчитывается по формуле (2):

$$y^2 = 2 * p * x. \quad (2)$$

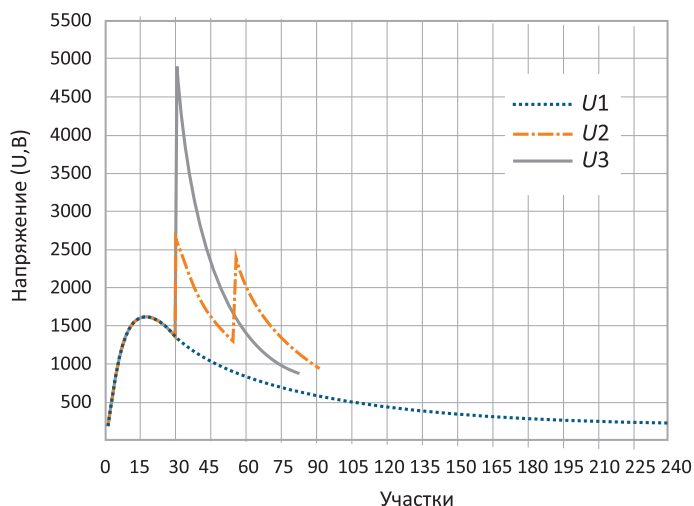


Рис. 3. Комбинированный вариант: U1 – первоначальный вариант, U2 – первые 30 значений от U1, далее уменьшение количества участков в 2 раза, затем в 4 раза; U3 – первые 30 значений от U1, затем уменьшение количества участков в 4 раза

Тогда, выражая верхнюю ветвь параболы, получаем:

$$y = \sqrt{2 * p * x}, \quad (3)$$

где  $y$  – напряжение на участке,  
 $p, x$  – коэффициенты.

Методом подбора коэффициент  $p$  был выбран:

$$p = 1000.$$

Тогда как коэффициент  $x$  будет меняться от участка к участку и зависеть от их общего количества. В данном варианте было выбрано количество участков  $a = 90$ . Тогда:

$$x_1 = 50, \\ x_{2..x_{90}} = x_{n-1} + 150, \text{ где } n = 2..90.$$

В данном случае расчёт велся до достижения  $y$  максимального значения по условию, то есть не превышая 2000 В. Таким значением оказалось  $y = 1936,49$  В, после чего цикл с увеличением коэффициента  $x$  необходимо остановить и зафиксировать его значение. Таким образом (рис. 4):

$$x_{60..x_{90}} = 6250.$$

Ограничение в 2 кВ было установлено для сохранения изоляции ступенчатых сопротивлений нисходящих на контактный провод, но так как авторами предлагается использование в УИС КС наноконпозитов, то это ограничение можно увеличить в 2,5 раза:

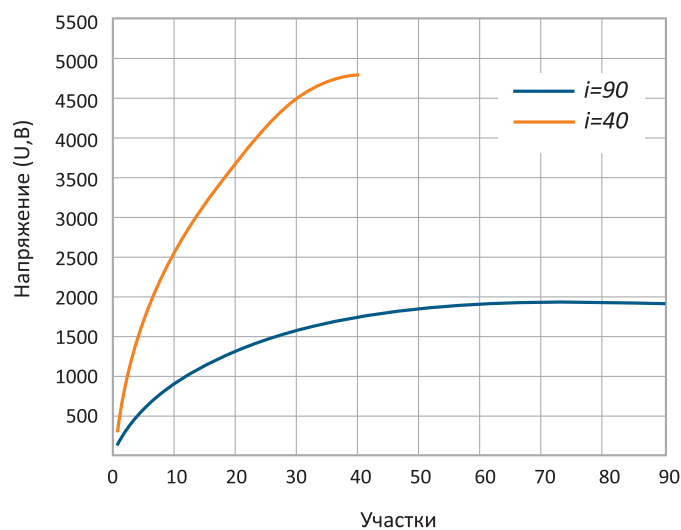


Рис. 4. Кривые напряжения для  $a = 90$  и  $a = 40$

$$y_{предел} = 5000 \text{ В.}$$

Учитывая это условие, уменьшаем количество участков до  $a = 40$ , коэффициент  $x$  берем следующий:

$$x_1 = 50,$$

$$x_{2..x_{30}} = x_{n-1} + 350,$$

$$x_{31..x_{34}} = x_{m-1} + 200,$$

$$x_{35..x_{37}} = x_{l-1} + 100,$$

$$x_{38..x_{40}} = x_{b-1} + 150,$$

где  $n = 2..30, m = 31..40, l = 35..37, b = 38..40$ .

Тогда напряжение на последующих участках будет постепенно увеличиваться, достигая в конце значения близкого 5 кВ. Внесение изменения в цикл суммирования необходимо для сглаживания кривой на последних 10 участках (рис. 4).

Выполнив преобразование стандартных формул с применением закона Ома, можем посчитать сопротивление каждого участка  $R_y$  по формулам (4) и (5), ток  $I_i$  в цепи в зависимости от того, на каком участке ПС (6) и самое важное – количество теплоты  $Q_o$  на  $i$ -том участке (8), которое необходимо для проверки условий разрушения КП по причине плавления.

Количество тепла будет самым большим на каждом участке в момент, когда ПС будет на последнем участке, поэтому дальнейшие расчёты будем выполнять из условия максимального времени воздействия тока на каждый участок.

Сопротивление на первом участке будет рассчитываться следующим образом:

$$R_{y1} = \frac{R_{nc} * U_{n1}}{U_c - U_{n1}}, \quad (4)$$

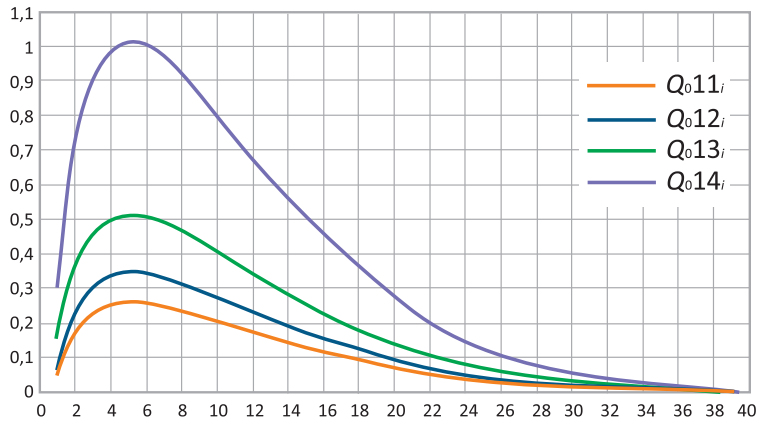


Рис. 5. Максимальные значения теплоты Q на i-тых участках при длине УИС КС  $L_{общ} = 5$  м и при различных  $V_{пс}$

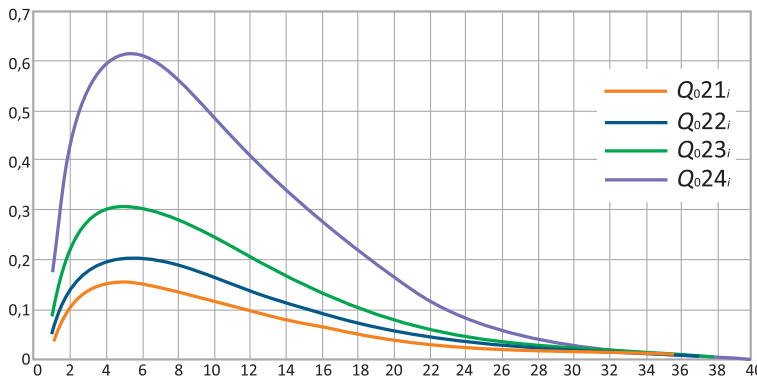


Рис. 6. Максимальные значения теплоты Q на i-тых участках при длине УИС КС  $L_{общ} = 3$  м и при различных  $V_{пс}$

В то время как сопротивления участков с 2 по 40 по:

$$R_{yi} = \frac{[R_{nc} + \sum_{z=1}^{i-1} R_{yz}] * U_{ni}}{U_c - U_{n1}}, \quad (5)$$

где  $U_c$  – напряжение сети,  
 $U_{ni}$  – напряжение на i-том участке в момент нахождения на нём ПС.

Ток  $I_i$  в момент нахождения ПС на i-том участке будет равен:

$$I_i = \frac{U_c}{R_{oi}}, \quad (6)$$

где  $R_{oi}$  – суммарное сопротивление, которое участвует в работе цепи в момент нахождения ПС на i-том участке:

$$R_{oi} = R_{nc} + \sum_{j=1}^i R_{yj}. \quad (7)$$

Количество тепла в свою очередь будет находиться по Закону Джоуля-Ленца:

$$Q_k = \sum_{i=1}^{40} [(I_i)^2 * R_{yk} * t], \quad (8)$$

где  $k = 1...40$ ,  $t$  – время прохождения ПС одного участка. Так как длина всех участков принимается одинаковой, то:

$$t = \frac{L_{общ}}{v_{пс} * \alpha}. \quad (9)$$

На рис. 5 представлены кривые максимальных значений тепла  $Q$ , накопленного на каждом участке, где общее количество участков  $i = 40$ , при длине УИС КС  $L_{общ} = 5$  метров. На графике представлены четыре кривые соответствующие скоростному режиму прохождения нейтральной вставки (табл. 2).

Из графика видно, что при скорости подвижного состава  $V_{пс4} = 100$  км/ч количество теплоты  $Q_{014}$  превышает 1 Вт·ч. С целью снизить показания  $Q_{0i}$  общая длина была уменьшена до  $L_{общ} = 3$  м (рис. 6). В данном случае удалось снизить максимальное количество теплоты при движении ПС на скорости  $V_{пс4} = 100$  км/ч до  $Q_{024_{max}} = 0,613$  Вт·ч.

На рис. 7 представлен график максимальных значений тепла  $Q$  для длины УИС КС  $L_{общ} = 2$  метра при движении ПС на скоростях от 100 км/ч до 400 км/ч. В этом случае длина участка будет равна:

$$L_{участка} = \frac{L_{общ}}{\alpha} = \frac{2000 \text{ мм}}{40} = 50 \text{ мм} \quad (10)$$

Таблица 2

Скорость \ $L_{общ}$	5 м	3 м	2 м
$V_{пс1} = 400$ км/ч	$Q_{011}$	$Q_{021}$	$Q_{031}$
$V_{пс2} = 300$ км/ч	$Q_{012}$	$Q_{022}$	$Q_{032}$
$V_{пс3} = 200$ км/ч	$Q_{013}$	$Q_{023}$	$Q_{033}$
$V_{пс4} = 100$ км/ч	$Q_{014}$	$Q_{024}$	$Q_{034}$

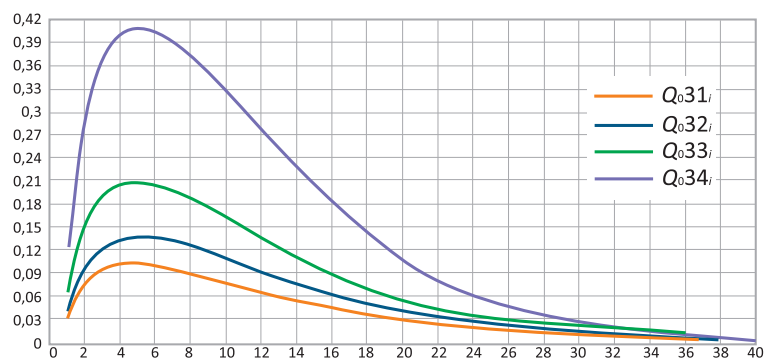


Рис. 7. Максимальные значения теплоты Q на i-тых участках при длине УИС КС  $L_{общ} = 2$  м и при различных  $V_{пс}$

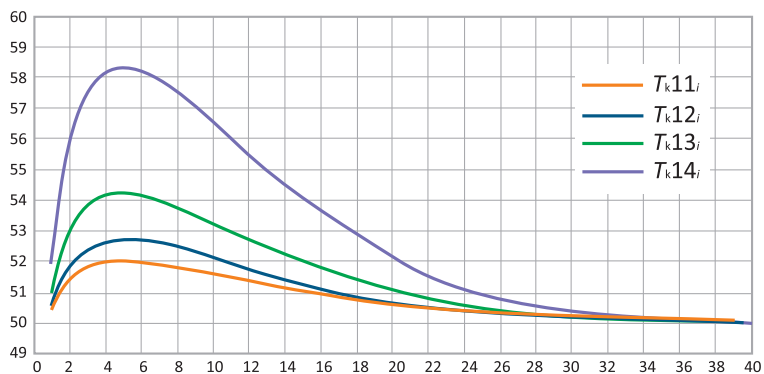


Рис. 8. Максимальные температуры  $i$ -тых участков  $T_k$  при максимальных  $Q$  на  $i$ -тых участках

Максимальное значение количества тепла будут достигаться на пятом участке и составлять:

$$Q_{o31} = 0,102 \text{ Вт} \cdot \text{ч}$$

$$Q_{o32} = 0,136 \text{ Вт} \cdot \text{ч}$$

$$Q_{o33} = 0,204 \text{ Вт} \cdot \text{ч}$$

$$Q_{o34} = 0,408 \text{ Вт} \cdot \text{ч}$$

Данное значение длины УИС КС является оптимальным, так как сохраняется достаточная длина отдельных участков для нанесения нанокompозита для формирования ступенчатых сопротивлений и при этом максимальные значения количества выделяемого тепла не приводят к плавлению материала КП [13]. С экономической точки зрения результат тоже положительный, так как произвести 2 метра УИС КС будет стоить дешевле. При снижении общей длины УИС КС (до 1 метра и менее) многократно возрастает сложность формирования ступенчатых сопротивлений.

По [14] плотность провода марки МФ-100 составляет:

$$\rho = 8,92 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$$

По формуле количества теплоты можно выразить конечную температуру тела  $T_k$ :

$$T_k = \frac{3600 * Q_o}{c * M} + T_o, \quad (11)$$

где  $c$  – удельная теплоёмкость вещества, для МФ-100  $c_{\text{меди}} = 400 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} * ^\circ \text{C}}$ ,  
 $T_o$  – начальная температура вещества, которую примем  $50^\circ \text{C}$ ,  
 $M$  – масса вещества:

$$M = \rho * V = \frac{\rho}{1000} * L_{\text{участка}} * S = \frac{\rho * L_{\text{участка}} * S}{1000} = 0,446 \quad (12)$$

где  $V$  – объём тела, так как объектом выступает провод, в приближении цилиндр, то  $V = L_{\text{участка}} * S$ ;

$S$  – площадь сечения провода, для МФ-100  $S = 100 \text{ мм}^2$ .

По формуле (11) были получены максимальные температуры нагрева участков УИС КС при длине  $L_{\text{общ}} = 2$  метра при движении ПС на скоростях от 100 км/ч до 400 км/ч и при нахождении ПС на последнем участке УИС КС (рис. 8).

По графику максимальных значений теплоты  $Q$  на  $i$ -тых участках видно, что максимальному нагреву подвергался участок 5. По графику максимальных температур (рис. 8) можно увидеть, что максимальное изменение температуры составит примерно  $8^\circ \text{C}$ .

При нагреве участка на  $8^\circ \text{C}$  прогорания контактного провода происходить не будет. При этом такой нагрев не повлияет на качество провода на данном участке [15].

## ВЫВОДЫ

1. Были найдены безопасный ток  $I_{\text{min}} \approx 0,5 \text{ А}$  и допустимое напряжение  $U_{\text{mi}}$ .
2. Были проанализированы разные подходы к поиску оптимальной кривой напряжения.
3. Авторами были смоделированы необходимые кривые для количества участков  $a = 90$  и  $a = 40$ .
4. Для оптимального количества участков  $a = 40$  построены графики максимального количества тепла на  $i$ -тых участках при нахождении ПС на последнем участке и при следовании ПС на скоростях: 100 км/ч; 200 км/ч; 300 км/ч; 400 км/ч, для длины УИС КС  $L_{\text{общ}} = 2$  метра, 3 метра и 5 метров.
5. Для максимального количества тепла на  $i$ -тых участках построен график максимальных температур  $T_k$  на  $i$ -тых участках при нахождении ПС на последнем участке и при следовании ПС на скоростях: 100 км/ч; 200 км/ч; 300 км/ч; 400 км/ч, для длины УИС КС  $L_{\text{общ}} = 2$  метра.

## Список источников

1. J. Duncan Glover, Thomas J. Overbye, and Mulukutla S. Sarma. Power System Analysis & Design. – 6 Edition. – Boston, 2017. – 962 p.
2. Правила технической эксплуатации железных дорог РФ. Утверждены Приказом Минтранса России от 21.12.2010 г. № 286. – М.: 2011. с изменениями и дополнениями от 4 июня 2012 г., 30 марта, 9 ноября, 25 декабря 2015 г., 3 июня



## List of References

2016 г., 30 января, 9 февраля, 5 октября, 25 декабря 2018 г. 12.08.11 г., 04., 13 06.12 г. и 30.03., 09.05, 25.12, 15 г. 03.06, 01.09. 16 г., 30.01., 09.02., 05.10, 25.12.18 г.

3. **Мамошин Р.Р., Зимакова А.Н.** Электроснабжение электрифицированных железных дорог: учеб. для техникумов ж.-д. транспорта. – М.: Транспорт, 1980. – 296 с.

4. **Фрайфельд А. В., Брод Г. Н.** Проектирование контактной сети. – М.: Транспорт, 1991. – 335 с.

5. **Беляев И.А.** Устройство и обслуживание контактной сети при высокоскоростном движении. – М.: Транспорт, 1989. – 143с.

6. **И.А. Беляев.** Машинисту о контактной сети и токосъеме. – М.: Транспорт, 1986. – 129.

7. **Михеев В.П.** Контактные сети и линии электропередачи: Учебник для вузов ж.-д. транспорта. – М.: Маршрут, 2003. – 416 с.

8. **Зимакова А.Н., Гиенко В.М., Скворцов В.А.** Контактная сеть электрифицированных железных дорог. Расчеты, выбор конструкций и составление монтажных планов: учебное пособие – 2-е изд. – М.: ФГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2011. – 232 с.

9. **Семенова Д.В., Карпенко В.И., Иодко Ю.В., Семенова Е.Ю.** Устройство изолирующего сопряжения контактной сети и нейтральной вставки для высокоскоростных магистралей железных дорог, электрифицированных на переменном токе // Патент RU 2533768C1. Бюл. 2006. № 31. 7с.

10. **Шевлюгин М.В., Семёнова Д.В.** Повышение эффективности высокоскоростной контактной подвески на переменном токе // Электричество. 2021. № 5. С. 39–43.

11. **Котельников А.В., Кузнецов А.В., Кузнецов Г.В., Мунькин В.В., Петропавлова О.В., Якимов Г.Б.** Контактная сеть переменного тока // Патент RU 2071426. 1997.

12. **Кузнецов А.В., Уманский В.И., Кузнецов Г.В., Кузнецов Д.Г.** Контактная сеть переменного тока // Патент RU 2404500C1. Бюл. 2010. № 32. 7 с.

13. **Марквардт К.Г., Власов И.И.** Контактная сеть. 3-е изд. – М.: Транспорт, 1977. – 272 с.

14. **Афанасьев А.С., Долаберидзе Г.П., Шевченко В.В.** Контактные и кабельные сети трамваев и троллейбусов. – М.: Транспорт, 1978. – 300 с.

15. **Ли В.Н., Кондратьев А.И., Муромцева Е.В., Химухин С.Н.** Механизмы разупрочнения и разрушения контактного провода // Дефектоскопия. 2003. № 12. С. 32–38.

1. **J. Duncan Glover, Thomas J. Overbye, and Mulukutla S. Sarma.** Power System Analysis & Design. – 6 Edition. – Boston, 2017. – 962 p.

2. Rules for the technical operation of the railways of the Russian Federation. Approved by Order of the Ministry of Transport of Russia dated December 21, 2010 No. No. 286. М.: 2011. with amendments and additions dated June 4, 2012, March 30, November 9, December 25, 2015, June 3, 2016, January 30, February 9, October 5, December 25, 2018 12.08.11, 04., 13 06.12 and 30.03., 09.05, 25.12, 15 03.06, 01.09. 16, 30.01., 09.02., 05.10, 25.12.18.

3. **Mamoshin R.R., Zimakova A.N.** Power supply of electrified railways: textbook for technical schools of the railroad. transport. – М.: Transport, 1980. – 296 p.

4. **Freifeld A.V., Brod G.N.** Design of a contact network. – М.: Transport, 1991. – 335 p.

5. **Belyaev I.A.** The device and maintenance of the contact network in high-speed traffic. – М.: Transport, 1989. – 143 p.

6. **Belyaev I.A.** To the driver about the contact network and current collection. – М.: Transport, 1986 – 129 p.

7. **Mikheev V.P.** Contact networks and power lines: Textbook for high schools railway. transport. – М.: Route, 2003. – 416 p.

8. **Zimakova A.N., Gienko V.M., Skvortsov V.A.** Contact network of electrified railways. Calculations, the choice of structures and the preparation of assembly plans: a textbook – 2nd ed.

9. **Semenova D.V., Karpenko V.I., Iodko Yu.V., Semenova E.Yu.** Insulating connection device of the contact network and neutral insert for high-speed railway lines electrified on alternating current // Patent RU 2533768C1. Bull. 2006. No 31. 7 p.

10. **Shevlyugin M.V., Semenova D.V.** Improving the efficiency of high-speed contact suspension on alternating current // Electricity. 2021. No 5. P. 39–43.

11. **Kotelnikov A.V., Kuznetsov A.V., Kuznetsov G.V., Munkin V.V., Petropavlova O.V., Yakimov G.B.** Contact network of alternating current // Patent RU 2071426. 1997.

12. **Kuznetsov A.V., Umansky V.I., Kuznetsov G.V., Kuznetsov D.G.** Contact network of alternating current // Patent RU 2404500C1. 2010. Bull. No 32. 7 p.

13. **Markvardt K.G., Vlasov I.I.** Contact network. – М.: Transport, 1977 3rd edition. – 272 p.

14. **Afanasyev A.S., Dolaberidze G.P., Shevchenko V.V.** Contact and cable networks of trams and trolleybuses. – М.: Transport, 1978. – 300 p.

15. **Li V.N., Kondratiev A.I., Muromtseva E.V., Khimukhin S.N.** Mechanisms of softening and destruction of the contact wire // Defectoscopy. 2003. No 12. P. 32–38.