

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ КОНТАКТНОЙ СЕТИ И РЕЛЬСОВОЙ ЦЕПИ ПРИ РУДНИЧНОЙ ЭЛЕКТРОВОЗНОЙ ОТКАТКЕ

ПУХОВ Е. М.

Доцент, кандидат технических наук

Расчет сечения контактной сети

1. Расчетная норма падения напряжения в контактной сети. Контактная сеть электрических ж. д. состоит из собственно контактной сети, рельсовой цепи, отсасывающих, питательных и подвешиваемых в случае недостаточности сечения основного контактного провода усиливающих фидеров. При расчете контактной сети исходят из норм допустимого падения напряжения. Главэнергопром¹⁾ рекомендует принимать норму среднего допустимого падения напряжения во всей сети в 15—20% от напряжения на шинах тяговых подстанций, причем при максимальной пиковой нагрузке допустимое падение напряжения может быть повышено до 35—40%. Проф. Ф. Н. Шклярский, так же как и проф. А. С. Бетехтин („Уголь“, № 3, 1939) исходят при расчете контактной сети из допустимого падения напряжения в 20%, т. е. при напряжении на шинах тяговой подстанции 275 в расчетное падение $\Delta u = 0,2 \cdot 275 = 55$ в.

Доц. С. А. Волотковский рекомендует несколько меньшую величину, а именно всего 15%, т. е. $\Delta u = 0,15 \cdot 275 = 40$ в.

Прежде всего необходимо отметить, что с точки зрения нормальной работы подвижного состава кратковременные колебания напряжения в 35—40% совершенно допустимы и не представляют никакой опасности. Кратковременное понижение напряжения на зажимах двигателя даже благоприятно отражается на его работе, так как в этом случае в первый момент (рис. 1) произойдет некоторое снижение тока. Никакой перегрузки двигателя при этом не будет. Действительно, в первый момент, когда скорость в силу инерции поезда не успеет снизиться, ток от значения I_1 упадет до величины I_2 —электровоз будет работать вместо характеристики I по характеристике II. Сила тяги электровоза при этом снизится до значения F_2 , что повлечет за собой снижение скорости, причем процесс замед-

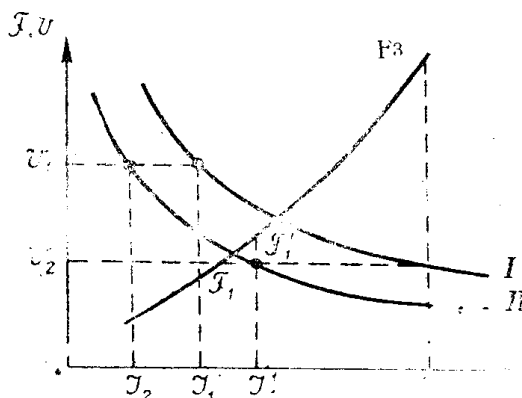


Рис. 1. Зависимость изменения силы тяги и тока при колебаниях напряжения в контактной сети.

Кривая I—зависимость скорости от тока при напряжении U_1 , кривая II—тоже при напряжении $U_2 < U_1$.

¹⁾ Сборник трудов Днепропетровского Горного института „Рудничный транспорт“ статья доц. Волотковского С. А., 1936

ления скорости движения будет иметь место до тех пор, пока ток I_2 снова не достигнет значения I_1 , после чего поезд будет двигаться с новой установившейся скоростью. Совершенно другое явление будет иметь место при резком, внезапном повышении напряжения. В этом случае при переходе поезда с характеристики II на характеристику I ток I_1' увеличится до значения I_3 , вследствие чего и сила тяги изменится от значения F_1' до F_3 —поезд получит некоторое ускорение, после чего ток будет падать, одновременно будет уменьшаться и сила тяги электровоза. Толчок тока при повышении напряжения особенно значителен и опасен тогда, когда двигатель до толчка работал на насыщенной части характеристики $E = f(I)$. Большой толчок тока может повлечь за собой целый ряд нежелательных последствий—буксование колес, круговой огонь на коллекторе и т. д. Посмотрим, как изменится значение силы тяги при резком повышении напряжения в контактной сети. Пусть для начальных условий скорость электровоза равна v_0 при напряжении в контактной сети U_0 и силе тока I_0 . Далее, пусть при напряжении U_1 скорость и ток электровоза соответственно равны v_1 и I_1 .

Очевидно, можно написать

$$v_0 = \frac{U_0}{kI_0} \quad \text{и} \quad v_1 = \frac{U_1}{kI_1}; \quad (1)$$

здесь k —постоянный коэффициент, зависящий от параметров тягового двигателя.

Так как в первый момент после скачка напряжения скорость $v_0 = v_1$, то

$$\frac{U_0}{kI_0} = \frac{U_1}{kI_1} \quad \text{или} \quad I_1 = I_0 \frac{U_0 + \Delta U}{U_0} = I_0 \left(1 + \frac{\Delta U}{U_0} \right) \quad (2)$$

ΔU —величина толчка напряжения.

Так как сила тяги и ток в тяговых серийных двигателях, работающих по так называемой „универсальной“ характеристике, связаны между собой уравнением вида:

$$F_k = C_1 I - C_2, \quad (3)$$

где C_1 и C_2 —некоторые постоянные коэффициенты, различные для различных типов двигателей (в частности для двигателя ТР-10 эта связь может быть выражена уравнением)

$$F_k = 12,5I - 150 \text{ кг},$$

где F_k —сила тяги на ободу колеса,

то подставляя значения F_0 и F_1 вместо I_1 и I_0 , уравнение (2) перепишем в следующем виде:

$$F_1 = F_0 \left(1 + \frac{\Delta U}{U_0} \right) + 150 \frac{\Delta U}{U_0}. \quad (4)$$

Таким образом, при резком повышении напряжения в контактной сети напр., на 40%, т. е. при $\frac{\Delta U}{U} = 0,4$, сила тяги $F_1 = 1,4 F_0 + 60$ кг, т. е. скачок силы тяги будет даже несколько выше, чем скачок тока. Однако можно доказать, что для электровоза с двигателями ТР-10 опасность пробуксовки ската может возникнуть при работе его до толчка с часовым током лишь при повышении напряжения на 29,5%.

Действительно, опасность пробуксовки ската возникнет только тогда, когда коэффициент сцепления превысит величину 0,25, т. е. когда сила

тяги превысит величину $F_1 = \frac{6000 \cdot 0,25}{2} = 750 \text{ кг}$ на один двигатель (здесь 6000 кг—вес электровоза).

Так как сила тяги при часовом токе $F_0 = 545 \text{ кг}$ (из характеристики двигателя), то, подставляя значения F_0 и F_1 в уравнение (4), получим:

$$750 = 545 \left(1 + \frac{\Delta U}{U_0} \right) + 150 \frac{\Delta U}{U_0},$$

откуда получим

$$\frac{\Delta U}{U_0} = 0,295$$

или 29,5% от напряжения в контактной сети.

При работе двигателя с током, равным току продолжительной мощности, опасность пробуксовки ската вообще не имеет места. Так как, с одной стороны, тяговой двигатель в условиях насыщения работает редко (особенно в рудничных условиях) и так как, с другой стороны, толчки тока и тяги будут резко сглаживаться в силу инерции поезда, которую мы до сих пор не учитывали, можно считать, что кратковременные колебания напряжения в контактной сети порядка 35—40% вполне допустимы.

Совершенно другое мы должны сказать относительно продолжительных колебаний напряжения. Величина среднего допустимого колебания напряжения должна быть определена из других соображений. Прежде всего, при решении этого вопроса мы должны обеспечить точное выполнение графика движения поездов.

Так как тяговые расчеты базируются на характеристике двигателя, построенной для определенного напряжения, необходимо, чтобы среднее напряжение на пантографах электровозов было равно расчетному напряжению, для которого построена характеристика двигателя. При соблюдении этого условия будет обеспечено нормальное выполнение графика движения поездов. Так как среднее падение напряжения до пантографов электровозов всегда несколько больше, чем падение напряжения в контактной сети (рис. 2), очевидно, что при напряжении

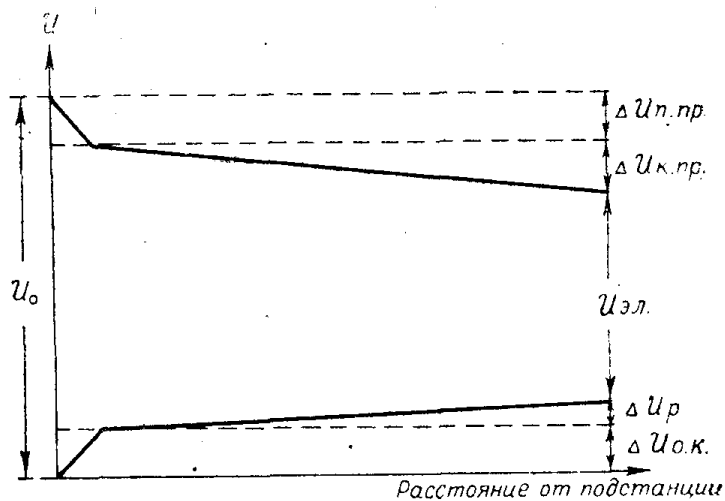


Рис. 2. Изменение напряжения до пантографа электровоза.

U_0 —напряжение на шинах подстанции, $\Delta U_{п. пр}$ — падение напряжения в питающем проводе, $\Delta U_{к. пр}$ —тоже в контактном проводе, ΔU_r —тоже в рельсовой цепи, $\Delta U_{о. к.}$ —тоже в отсасывающем кабеле, $U_{эл}$ —напряжение на пантографе электровоза.

на шинах тяговой подстанции в 275 в среднее напряжение на пантографах электровозов в 250 в будет обеспечено лишь в том случае, если допустимое падение напряжения во всей контактной сети не превышает 20%, а собственно в контактном проводе, примерно, 15%, если учесть, что около 5% теряется в рельсах, питающих и отсасывающих фидерах. Чтобы создать некоторый резерв для нагона опозданий, регулировки графика движения и т. д., следует для сильно загруженных рудничных уча-

стков ориентироваться на норму среднего падения напряжения до пантографов электровозов в 10—15% и для слабо загруженных участков на норму 15—20%.

2. Методология расчета контактной сети. При расчете контактной сети по среднему падению напряжения в линии наиболее точным методом является метод сечения графика движения поездов, сущность которого заключается в следующем: из графика выбирается наиболее интенсивный период продолжительностью 1—2 часа. В этом отрезке времени производится сечение графика через каждые 1—2 мин. Для каждого сечения находится момент токов I . Затем для всего интенсивного периода находится средний расчетный момент токов

$$I_{cp} = \frac{\sum I}{n}, \quad (5)$$

где n — число сечений графика.

По этому среднему расчетному моменту токов и производится расчет сечения контактного провода по обычной формуле

$$q_{к.ир.} = \frac{17,5 \cdot I_{cp}}{\Delta U - r_p I_{cp}}. \quad (6)$$

Здесь I_{cp} — средний момент токов в амп/км,

ΔU — допустимое падение напряжения в контактной сети и рельсовой цепи в вольтах,

r_p — покилометровое сопротивление рельсовой колеи в $\Omega/км$.

Производство самого расчета удобно производить в виде следующей таблицы (табл. 1).

Таблица 1

Таблица для расчета сечения контактной сети

№ сечения графика	№№ поездов	Расстояние от поезда до умформерной в км	Поездной ток в амперах	Момент токов	Суммарный момент токов для данного сечения
1	2	3	4	5	6
1	1	0.5	30	15	75
	2	1.5	40	60	

Далее производится проверка полученного сечения на наибольшее допустимое падение напряжения по той же формуле (6) для максимального момента токов, получившегося при сечении графика. При этом максимально допустимое падение напряжения не должно превышать 35—40% от напряжения на шинах подстанции. Метод сечения графика, хотя и является, несмотря на ряд допущений, наиболее точным методом, однако требует сравнительно большой затраты времени, особенно если сечения графика производить через каждые 2 мин.

Ввиду этого с целью экономии времени вместо метода сечения графика можно рекомендовать один из приближенных методов—либо метод проф. А. В. Лебедева—так называемый „метод подвижных нагрузок“, либо метод вероятностей, детально разработанный проф. В. Е. Розенфельдом. Первый из этих методов предполагает движение по параллельному графику, с постоянной скоростью, при постоянном расстоянии между поездами, причем поезда во все время движения потребляют ток, равный среднему поездному току. Во втором методе поезда потребляют

произвольный ток в пределах тока, потребляемого данным типом поездов, причем расстояние между поездами может быть совершенно произвольным. Первый из этих методов дает несколько преуменьшенные падения напряжения, второй же, наоборот, несколько преувеличенные. Таким образом, оба эти метода до некоторой степени корректируют друг друга. Выражения для основных интересующих нас величин даны в таблице 2¹⁾.

Таблица 2

	Метод подвижных нагрузок	Метод вероятностей
1. Падение напряжения до токоприемника за все время движения под током при одностороннем питании	$\frac{IRL(2N^2+1)}{6N}kt$	$\frac{IRL}{6}(2N+3\alpha-2)$
2. Потеря мощности при одностороннем питании	$\frac{I^2RL(2N^2+1)}{6}kt$	$\frac{I^2RLN}{6}(2N+1+3\alpha)$
3. Среднее падение напряжения до конца линии	—	$\frac{IRLN}{2}$

В этих формулах принято:

R — общее сопротивление контактной сети в $\Omega/\text{км}$, причем

$R = r_p + r_{к.пр}$, где r_p и $r_{к.пр}$ — покилометровые сопротивления рельсовой колеи и контактного провода,

I — средний поездной ток, причем $I = \frac{I_1 n_1 + I_2 n_2}{n_1 + n_2}$;

здесь I_1 и I_2 — средние токи, потребляемые поездами разных направлений,

n_1 и n_2 — число таких поездов. При исчислении I следует учесть дополнительный расход электроэнергии на маневры, освещение электровоза, его управление, потери в реостатах в пусковые периоды. Обычно влияние этих факторов учитывается коэффициентом 1,1.

$N^2) = n_1 + n_2$ — общее число поездов обоих направлений, одновременно находящихся на перегоне,

$k_t^3)$ — поправочный коэффициент,

L — длина откатки в км ,

α — отношение всего времени работы электровоза ко времени его работы под током.

Задаваясь средним падением напряжения до пантографов электровозов, легко найти сначала общее сопротивление сети R , затем сопротивление контактного провода $r_{к.пр}$, а, следовательно, и его сечение.

3. Определение „экономического“ сечения контактного провода. Легко доказать, что нет никакой необходимости определять так называемое „экономическое“ сечение контактного провода, так как оно будет в несколько раз больше сечения, необходимого по условию наибольшего падения напряжения. Действительно, если ограничиться

1) Проф. А. Б. Лебедев.—Расчеты основных элементов эл. ж. д., 1930.
Проф. В. Е. Розенфельд.—Расчет тяговых сетей, 1937.

2) Число поездов $N = \frac{2 A_{см}}{k.n.q}$,

где $A_{см}$ — сменная производительность откаточных путей,
 $k = T_{см}/T_{рейс}$ — число рейсов электровоза за смену,
 n — число вагонеток в составе,
 q — полезная емкость вагонетки.

3) В. Е. Розенфельд, Ю. Е. Рывкин, И. А. Лакштовский.—Электрическая тяга поездов, стр. 691, 1940.

только сравнением двух величин, зависящих от сечения провода, а именно годовых расходов по сети и стоимости теряемой в линии энергии и пренебречь всеми факторами, связанными с изменением скорости движения поездов вследствие изменения напряжения, то можно написать, что

$$A_{\text{э}} = A_{\text{к}}, \quad (7)$$

где $A_{\text{э}}$ — стоимость электрической энергии, потерянной в контактной сети в течение года,

$A_{\text{к}}$ — амортизационные отчисления и расходы по содержанию контактной сети.

Очевидно, что

$$A_{\text{э}} = c \cdot \Delta W, \quad (8)$$

где c — стоимость *квтчаса* энергии в рублях.

Потери мощности в сети по формуле проф. В. Е. Розенфельда

$$\Delta W = \frac{I^2 R L N}{6} (2N + 1 + 3\beta) \quad (9)$$

Если принять так называемое годовое число часов потерь τ для рудничных условий около 6000 ч., то стоимость потерянной за год в контактной сети электрической энергии будет равна

$$A_{\text{э}} = \frac{I^2 R L N}{6} (2N + 1 + 3\beta) \frac{6000}{1000} c \text{ руб.} \quad (10)$$

С другой стороны, годовые расходы по сети

$$A_{\text{к}} = ab \gamma L q_{\text{эк}}, \quad (11)$$

здесь a — амортизационные отчисления и годовые расходы по ремонту сетей,

b — стоимость 1 кг медного провода,

γ — удельный вес меди в кг/дцм^3 .

Подставляя в уравнение (7) значения $A_{\text{э}}$ и $A_{\text{к}}$, найдем „экономическое“ сечение контактного провода

$$q_{\text{эк}} \approx 4,22I \sqrt{\frac{N(2N + 1 + 3\beta)c}{ab\gamma}} \quad (12)$$

Среднее падение напряжения в контактной сети (табл. 2)

$$\Delta U = \frac{I R L N}{2}$$

Отсюда сечение провода, вычисленное по падению напряжения,

$$q = \frac{1000 I L N}{2 k \Delta U} = 0,22 I L N.$$

Если длину откатки выразить в километрах и принять падение напряжения ≈ 40 в, $c = 0,05$ руб/*квтч*, $a = 0,15$, $\gamma = 8,9$ кг/дцм^3 и $b = 2$ руб/*кг*, тогда

$$\frac{q_{\text{эк}}}{q} = \frac{2,63}{L} \sqrt{\frac{2N + 1 + 3\beta}{N}} \quad (13)$$

Задаваясь различными значениями L , N и β , видим, что при обычных длинах электровозной откатки „экономическое“ сечение контактного провода значительно превышает сечение, рассчитанное по допустимому паде-

¹⁾ $\beta = \frac{I_{\text{эфф}}^2 - I_{\text{ср}}^2}{I_{\text{ср}}^2}$ (стр. 702 цитированной выше книги В. Е. Розенфельда и др.).

нию напряжения. В условиях дефицита цветных материалов нет смысла производить расчет сечения контактного провода исходя из минимума годовых расходов.

Выводы

Резюмируя сказанное, следует прийти к выводу, что расчет сечения контактной сети необходимо производить исходя из средних условий работы электровозов на перегоне, т. е. из среднего падения напряжения до пантографов электровозов. Кроме того, следует производить проверку принятого сечения по наиболее тяжелому случаю графика движения поездов.

II. Расчет рельсовой цепи

1. Распределение токов в рельсовой цепи для „бесконечной“ и „конечной“ цепей. Методология расчета рельсовой цепи при электровозной откатке до настоящего времени почти не разработана, хотя правильный расчет ее крайне необходим с точки зрения выработки мер защиты от блуждающих токов.

Так как двустороннее питание откаточных путей пока не получило распространения в рудничных условиях, главным образом в силу незначительной длины откатки, ограничимся рассмотрением случая одностороннего питания.

Еще Forwald в своей статье „Streckenimpedanz und Schienenstrom bei Einphasenbahnen“ схему распределения токов в этом случае дал в следующем виде (рис. 3).

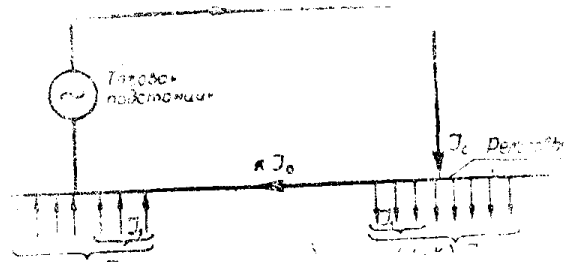


Рис. 3. Распределение токов в рельсовой цепи по Forwald'у.

Однако Forwald в этой статье не дал соотношения между поездным током и токами, оттекающими в сторону забоя, а также в направлении к тяговой подстанции. Кроме того, данное им значение коэффициента k

действительно лишь для однофазного тока.

Эту схему представим в несколько ином виде (рис. 4).

В точке приложения нагрузки B полный поездной ток I_0 разветвляется на токи I_1 и I_2 . Часть токов i_1 и i_2

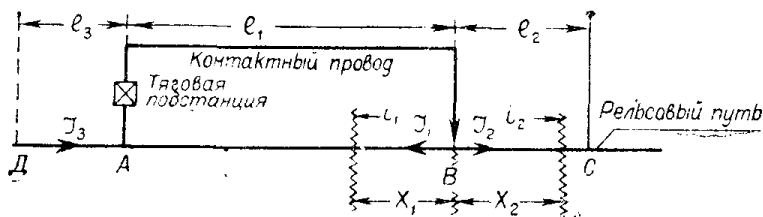


Рис. 4. Схема распределения токов в рельсовой цепи.

течет по рельсу, часть же, в силу неполной изоляции рельса от почвы, ответвляется в последнюю. Для рудничных условий важно знать не только закон изменения токов на участке AB между подстанцией и поездом, но и на участке BC , особенно в том случае, когда в шахте применяется электрическое паление шпуров.

Введем следующие обозначения:

- r_p — километровое сопротивление рельсового пути с учетом сопротивления стыков в $\Omega/\text{км}$,
- r_3 — переходное сопротивление от рельс к почве, тоже в $\Omega/\text{км}$,

$$p = \sqrt{\frac{r_p}{r_s}}$$

I_0 — полный поездной ток,

i_1, i_2, i_3 — токи в рельсах на участках AB, BC и AD ,

U_1, U_2, U_3 — потенциалы рельсов относительно почвы на тех же участках,

I_1, I_2, I_3, I_4 — составляющие полного поездного тока в точках A и B .

Хотя удельное сопротивление почвы и достаточно велико, однако в силу ее большого объема сопротивлением почвы можно свободно пренебречь.

Чтобы найти картину изменения токов вдоль рельсового пути, найдем в общем виде зависимость между i, p и длинами. В любой точке рельсового пути величина отходящего в почву тока на участке dx будет

$$di_s = \frac{U_p - U_s}{r_s} dx. \quad (14)$$

Здесь U_p и U_s — потенциалы рельс и почвы в рассматриваемой точке.

Из этого уравнения находим

$$\frac{di_s}{dx} = \frac{U_p - U_s}{r_s}.$$

Возьмем вторую производную от i по x , принимая потенциал почвы U_s за постоянную величину,

$$\frac{d^2 i_s}{dx^2} = \frac{dU_p}{dx} \frac{1}{r_s}. \quad (15)$$

Так как поездной ток $I_0 = i_s + i_p$ не зависит от x , то

$$di_p = - di_s,$$

т. е. каждому изменению тока в рельсе соответствует такое же, но взятое с обратным знаком изменение тока, ответвляющегося в почву. Элементарное изменение потенциала рельса, очевидно, может быть выражено в следующем виде:

$$dU_p = - i_p r_p dx \quad (16)$$

или

$$\frac{dU_p}{dx} = - i_p r_p.$$

Подставим это выражение в уравнение (15)

$$\frac{d^2 i_s}{dx^2} = - \frac{d^2 i_p}{dx^2} = - i_p \frac{r_p}{r_s} = - i_p p^2$$

или

$$\frac{d^2 i_p}{dx^2} - i_p p^2 = 0.1) \quad (17)$$

Таким образом, получим искомую зависимость в виде дифференциального уравнения.

Интеграл этого уравнения имеет вид

$$i = C_1 ch. px + C_2 sh px, \quad (18)$$

где C_1 и C_2 — постоянные интегрирования, разные для различных участков рассматриваемой нами рельсовой цепи.

¹⁾ Прсф. Лебедев. — Основы электрической тяги. ОНТИ, 1937

Рассмотрим каждый в отдельности участок AB , BC и CD .

I. Участок BC . За начало координат примем точку B . Очевидно, что при $x_2=0$ $i_2=I_2=C_1$ и при $x_2=l_2$ $i_2=0$, так как при бесконечном удалении от поезда ток в рельсе становится равным нулю.

Таким образом, $I_2 \operatorname{ch} pl_2 + C_2 \operatorname{sh} pl_2 = 0$ или $C_2 = -I_2 \operatorname{cth} pl_2$, изменение тока i_2 на участке BC может быть выражено следующим уравнением:

$$i_2 = I_2 \operatorname{ch} px_2 - I_2 \operatorname{cth} pl_2 \operatorname{sh} px_2. \quad (19)$$

II участок AD . Начало координат—точка A . При $x_3=0$, $i_3=I_3=C_1'$ и при $x_3=l_3$ $i_3=0$. Аналогично предыдущему случаю получим

$$i_3 = -I_3 \operatorname{ch} px_3 + I_3 \operatorname{cth} pl_3 \operatorname{sh} px_3. \quad (20)$$

III участок AB . Начало координат—точка B .

При $x_1=0$ $i_1=I_1=C_1''$, при $x_1=l_1$ $i_1=I_4=C_1'' \operatorname{ch} pl_1 + C_2'' \operatorname{sh} pl_1$ или

$$C_2'' = \frac{I_4 - I_1 \operatorname{ch} pl_1}{\operatorname{sh} pl_1}$$

и, наконец,

$$i_1 = I_1 \operatorname{ch} px_1 + \frac{I_4 - I_1 \operatorname{ch} pl_1}{\operatorname{sh} pl_1} \operatorname{sh} pl_1. \quad (21)$$

Для удобства расчетов токи I_1 , I_2 , I_3 и I_4 выразим через поездной ток I_0 .

$$\left. \begin{aligned} I_1 + I_2 &= I_0 \\ I_3 + I_4 &= I_0 \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

Для точек A и B , кроме того, можем написать следующие равенства:

$$\left. \begin{aligned} \left. \frac{di_1}{dx_1} \right|_{x_1=0} &= \left. \frac{di_2}{dx_2} \right|_{x_2=0} & \text{и} & \left. \frac{di_3}{dx_3} \right|_{x_3=0} = \left. \frac{di_1}{dx_1} \right|_{x_1=l_1}; \\ \left. \frac{di_1}{dx_1} \right|_{x_1=l_1} &= \left. \frac{di_2}{dx_2} \right|_{x_2=l_2} & \text{и} & \left. \frac{di_3}{dx_3} \right|_{x_3=l_3} = \left. \frac{di_1}{dx_1} \right|_{x_1=0}; \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

первое из этих равенств дает следующее соотношение между токами

$$I_1 \operatorname{sh} pl_1 + \frac{I_4 - I_1}{\operatorname{sh} pl_1} \operatorname{ch} pl_1 = I_3 \operatorname{cth} pl_3,$$

второе равенства дает

$$I_1 \operatorname{ch} pl_1 - I_2 \operatorname{cth} pl_2 \operatorname{sh} pl_1 = I_4.$$

Из этих равенств, а также из уравнения (22) находим сначала ток I_1 , а затем токи I_2 и I_3 . Не приводя последовательного хода решения ввиду его громоздкости, приведем окончательные зависимости:

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \frac{\operatorname{ch} pl_2 \operatorname{sh} p(l_1 + l_2) + \operatorname{ch} pl_3 \operatorname{sh} pl_2}{\operatorname{sh} p(l_1 + l_2 + l_3)} I_0, \\ I_2 &= \frac{\operatorname{sh} pl_2 \operatorname{sh} p(l_1 + l_2) - \operatorname{ch} pl_3 \operatorname{sh} pl_2}{\operatorname{sh} p(l_1 + l_2 + l_3)} I_0, \\ I_3 &= \frac{\operatorname{sh} pl_3 \operatorname{ch} p(l_1 + l_2) - \operatorname{ch} pl_2 \operatorname{sh} pl_3}{\operatorname{sh} p(l_1 + l_2 + l_3)} I_0, \\ I_4 &= \frac{\operatorname{ch} pl_2 \operatorname{sh} pl_3 + \operatorname{ch} pl_3 \operatorname{sh} p(l_1 + l_2)}{\operatorname{ch} p(l_1 + l_2 + l_3)} I_0. \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

Так как при выводе этих формул участки AD и BC были приняты бесконечной длины, для получения выражений для токов i_2 , i_1 и i_3 необходимо избавиться от выражений, содержащих длины l_2 и l_3 , так как в

этом случае получают неопределенности вида $\frac{\infty}{\infty}$. Для этого найдем

значения $\frac{I_1}{I_2}$ и $\frac{I_3}{I_4}$ при $l_2 = \infty$ и $l_3 = \infty$;

$$\begin{aligned} \frac{I_1}{I_2} &= \frac{ch pl_2 sh pl_1 ch pl_3 + ch pl_2 sh pl_3 ch pl_1 + ch pl_3 sh pl_2}{sh pl_2 ch pl_1 ch pl_3 + sh pl_2 sh pl_3 sh pl_1 - ch pl_3 sh pl_2} = \\ &= \frac{ch pl_3 sh pl_2 [cth pl_2 sh pl_1 + ch pl_2 th pl_3 ch pl_1 + 1]}{ch pl_3 sh pl_2 [ch pl_1 + sh pl_1 th pl_3 - 1]}, \end{aligned}$$

так как $cth \infty = 1$ и $th \infty = 1$, то

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{sh pl_1 + ch pl_1 + 1}{sh pl_1 + ch pl_1 - 1} = \frac{2sh \frac{pl_1}{2} ch \frac{pl_1}{2} + 2ch^2 \frac{pl_1}{2}}{2sh \frac{pl_1}{2} ch \frac{pl_1}{2} + 2sh^2 \frac{pl_1}{2}} = cth \frac{pl_1}{2}. \quad (25)$$

Получим таким образом известную формулу Dell'Arciprete.

Аналогично предыдущему найдем и $\frac{I_3}{I_4}$ при $l_3 = \infty$

$$\frac{I_3}{I_4} = th \frac{pl_1}{2} \quad (26)$$

Пользуясь выведенными выражениями для $\frac{I_1}{I_2}$ и $\frac{I_3}{I_4}$, найдем I_1, I_2, I_3 , и I_4 через полный поездной ток I_0

$$\frac{I_1 + I_2}{I_2} = cth \frac{pl_1}{2} + 1,$$

или

$$I_2 = \frac{I_0}{1 + cth \frac{pl_1}{2}} = \frac{I_0 th \frac{pl_1}{2}}{1 + th \frac{pl_1}{2}}.$$

Точно так же находим

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \frac{I_0}{1 + th \frac{pl_1}{2}}, \\ I_3 &= \frac{I_0 th \frac{pl_1}{2}}{1 + th \frac{pl_1}{2}}, \\ I_4 &= \frac{I_0}{1 + th \frac{pl_1}{2}}. \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

Подставляя значения I_1, I_2, I_3 и I_4 в уравнения 19, 20, 21, найдем:

$$i_1 = I_1 ch px_1 + \frac{I_4 - I_1 ch pl_1}{sh pl_1} sh px_1$$

или, после подстановки и упрощений,

$$i_1 = I_2 \frac{\text{sh } p(l_1 - x_1) + \text{sh } px_1}{\text{sh } pl_1 \left(1 + \text{th } \frac{pl_1}{2}\right)} I_0. \quad (28a)$$

Аналогично

$$i_2 = I_2 (\text{ch } px_2 - \text{cth } pl_2 \text{sh } px_2)$$

или

$$i_2 = \frac{\text{th } \frac{pl_1}{2} \text{ch } px_2 - \text{cth } pl_2 \text{sh } px_2}{1 + \text{th } \frac{pl_1}{2}} I_0. \quad (28б)$$

Наконец,

$$\begin{aligned} i_3 &= I_3 (\text{cth } pl_3 \text{sh } px_3 - \text{ch } px_3) = \\ &= \frac{\text{th } \frac{pl_1}{2}}{1 + \text{th } \frac{pl_1}{2}} (\text{cth } pl_3 \text{sh } px_3 - \text{ch } px_3) I_0. \end{aligned} \quad (28в)$$

Найдем разность потенциалов на наиболее важных с точки зрения защиты от блуждающих токов участках AB и BC .

Согласно уравнению (52) напомним

$$-U_{AB} = \int_0^{l_1} i_1 r_p dx_1 = \frac{2(\text{ch } pl_1 - 1)}{\text{sh } pl_1 \left(1 + \text{th } \frac{pl_1}{2}\right)} \frac{r_p}{p} I_0 = \frac{2\text{th } \frac{pl_1}{2}}{1 + \text{th } \frac{pl_1}{2}} \frac{r_p}{p} I_0; \quad (29)$$

далее

$$\begin{aligned} -U_{BC} &= \int_0^{l_2} i_2 r_p dx_2 = \frac{\text{th } \frac{pl_1}{2}}{1 + \text{th } \frac{pl_1}{2}} \frac{r_p}{p} I_0 \left[\text{sh } pl_2 - \text{cth } pl_2 (\text{ch } pl_2 - 1) \right] = \\ &= \frac{\text{th } \frac{pl_1}{2} \text{th } \frac{pl_1}{2}}{1 - \text{th } \frac{pl_1}{2}} \frac{r_p}{p} I_0. \end{aligned} \quad (30)$$

Чтобы построить картину обмена токами между рельсами и почвой, надо найти потенциал рельса относительно почвы для любой точки рельсового пути.

На участке AB потенциал рельсов относительно почвы будет изменяться по следующему закону (уравнение 29).

$$U_{A-B} = \frac{I_0}{\text{sh } pl_1 \left(1 + \text{th } \frac{pl_1}{2}\right)} \frac{r_p}{p} \left[\text{ch } px_1 - \text{ch } p(l_1 - x_1) \right]$$

и на участке BC

$$U_{B-C} = \frac{I_0 \text{th } \frac{pl_1}{2} \text{th } \frac{pl_2}{2}}{1 + \text{th } \frac{pl_1}{2}} \frac{r_p}{p} \left[\text{sh } px_2 - \text{cth } pl_2 \text{ch } px_2 \right]. \quad (31)$$

Формулы Dell'Arciprete выведены, как было указано выше, для бесконечно длинных участков AD и BC , между тем в литературе имеются указания, что ток i_2 на участке BC на сравнительно близком расстоянии от поезда почти совсем исчезает. Так, по данным доц. Озерного („Уголь“ 1938 г. № 150) ток i_2 исчезает в некоторых случаях уже на расстоянии 60 м от поезда, составляя на расстоянии 50 м от поезда всего 1,3% первоначальной величины поездного тока. Правда, в других случаях этот процент значительно больше. Так, например, по тем же опытным данным доц. Озерного на уклоне № 6 п. № 3 ток на расстоянии 100 м от поезда составлял 16,1%, уменьшаясь до 3,2% на расстоянии 200 м.

Выведем формулы для значений токов I_1, I_2, I_3 и I_4 , а также токов i_1, i_2 и i_3 для случая, когда длины l_2 и l_3 имеют конечную величину. Пусть на участках AD и BC на расстоянии a метров в первом случае от подстанции и во втором от поезда ток исчезает. В этом случае для участка BC можем написать:

$$\left. \begin{aligned} i_1 &= I_1 \operatorname{ch} px_1 + \frac{I_4 - I_1 \operatorname{ch} pa}{\operatorname{sh} pa} \operatorname{sh} px_1, \\ i_2 &= I_2 \operatorname{ch} px_2 - I_2 \operatorname{cth} pa \operatorname{sh} px_2, \\ i_3 &= I_3 (\operatorname{cth} pa \operatorname{sh} px_3 - \operatorname{ch} px_3). \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

При этом, как мы видели ранее,

$$\begin{aligned} I_1 = I_4 &= \frac{\operatorname{ch} pa \operatorname{sh} p(l_1 + a) + \operatorname{ch} pa \operatorname{sh} pa}{\operatorname{sh} p(l_1 + 2a)} I_0 = \\ &= \frac{\operatorname{ch} pa [\operatorname{sh} p(l_1 + a) + \operatorname{sh} pa]}{\operatorname{sh} p(l_1 + 2a)} I_0 = \frac{2 \operatorname{ch} pa \operatorname{ch} \frac{pl_1}{2} \operatorname{sh} p\left(\frac{l_1}{2} + a\right)}{\operatorname{sh} p(l_1 + 2a)} \end{aligned}$$

и

$$I_2 = I_3 = \frac{2 \operatorname{sh} pa \operatorname{sh} \frac{pl_1}{2} \operatorname{sh} p\left(\frac{l_1}{2} + a\right)}{\operatorname{sh} p(l_1 + 2a)} I_0. \quad (33)$$

Таким образом, в отличие от случая, рассмотренного Dell'Arciprete, мы для нашего случая, когда l_2 и l_3 имеют конечную длину, можем написать

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{2 \operatorname{ch} pa \operatorname{ch} \frac{pl_1}{2} \operatorname{sh} p(l_1 + 2a)}{2 \operatorname{sh} pa \operatorname{sh} \frac{pl_1}{2} \operatorname{sh} p(l_1 + 2a)} = \operatorname{cth} pa \operatorname{cth} \frac{pl_1}{2}$$

и

$$\frac{I_3}{I_4} = \operatorname{th} pa \operatorname{th} \frac{pl_1}{2}. \quad (34)$$

Различие в этом случае выражается в появлении дополнительных множителей $\operatorname{cth} pa$ и $\operatorname{th} pa$.

Токи I_1 и I_2 через полный поездной ток могут быть выражены следующими формулами:

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \frac{I_0}{1 + \operatorname{th} pa \operatorname{th} \frac{pl_1}{2}} \\ I_2 &= \frac{I_0 \operatorname{th} pa \operatorname{th} \frac{pl_1}{2}}{1 + \operatorname{th} pa \operatorname{th} \frac{pl_1}{2}} \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

получим, далее, следующие выражения для токов i_2, i_1 и i_3 :

$$\begin{aligned}
 i_2 &= I_2 \operatorname{ch} px_2 - I_2 \operatorname{cth} pa \operatorname{sh} px_2 = (\operatorname{cth} px_2 - \operatorname{cth} pa \operatorname{sh} px_2) \frac{\operatorname{th} pa \operatorname{th} \frac{pl_1}{2}}{1 + \operatorname{th} pa \operatorname{th} \frac{pl_1}{2}} I_0, \\
 i_3 &= (\operatorname{cth} pa \operatorname{sh} px_3 - \operatorname{ch} px_3) \frac{\operatorname{th} pa \operatorname{th} \frac{pl_1}{2}}{1 + \operatorname{th} pa \operatorname{th} \frac{pl_1}{2}} I_0, \\
 i_1 &= \frac{\left(\operatorname{ch} px_1 - \operatorname{sh} px_1 \operatorname{th} \frac{pa}{2} \right) I_0}{1 + \operatorname{th} pa \operatorname{th} \frac{pl_1}{2}}.
 \end{aligned}
 \tag{36}$$

Определим, наконец, для разбираемого случая разность потенциалов на участках AB и BC .

$$\begin{aligned}
 -U_{AB} &= \int_0^{l_1} i_1 r_p dx_1 = \frac{\operatorname{ch} pl - \operatorname{sh} pl \operatorname{th} \frac{pa}{2} - 1}{1 + \operatorname{th} pa \operatorname{th} \frac{pl_1}{2}} \frac{r_p}{p} I_0, \\
 -U_{BC} &= \int_0^{l_1} i_2 r_p dx_2 = \frac{(\operatorname{cth} pl_2 \operatorname{th} pa - \operatorname{th} pa - \operatorname{sh} pl_2) \operatorname{th} \frac{pl_1}{2}}{1 + \operatorname{th} pa \operatorname{th} \frac{pl_1}{2}} \frac{r_p}{p} I_0.
 \end{aligned}
 \tag{37}$$

Таким образом мы получили все интересующие нас данные и для случая, когда длины участков AD и BC имеют конечную величину.

2. Методология экспериментального определения параметров рельсовой цепи. Прежде всего вкратце остановимся на методологии определения переходного сопротивления между рельсами и почвой. Для определения этой величины имеется целый ряд методов. Наиболее часто в практике работы приходится пользоваться двумя из них, а именно методом Ohio Brass и методом проф. Р. Подоского. Первый из этих методов дает возможность одновременно с определением переходного сопротивления между рельсом и почвой определить также и сопротивление самой рельсовой колеи. Измерения по этому методу¹⁾ производятся по схеме рис. 5.

Схема измерений по способу проф. Р. Подоского представлена на рис. 6.

Сопротивление рельсовой колеи R_p и переходное сопротивление между рельсом и почвой R_g по методу Ohio Brass могут быть найдены по следующим формулам:

$$\begin{aligned}
 R_p &= \frac{U_1 - U_2}{2(I_1 + I_2)} \\
 R_g &= \frac{U_1 + U_2}{8(I_1 - I_2)}
 \end{aligned}
 \tag{38}$$

¹⁾ См. статью инж. Ю. Рывкина «Электричество», 1930 № 21.

Приведем вывод этих формул, так как в литературе этого вывода нет, между тем как он крайне необходим для оценки степени получающейся при измерениях точности.

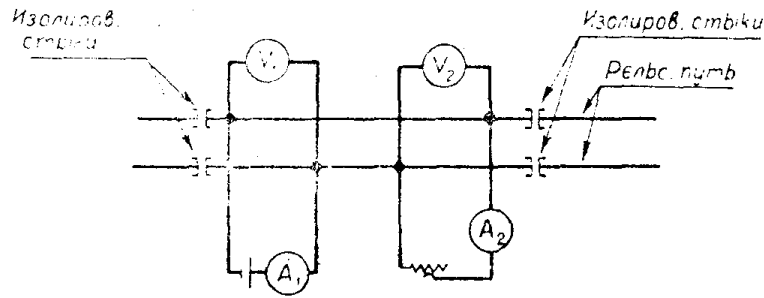


Рис. 5. Измерение переходного сопротивления от рельс к почве по методу „Ohio Brass“.

Как известно, для цепи с распределенными постоянными можно написать следующие уравнения:

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= U_2 \operatorname{ch} \sqrt{rg} l + I_2 \sqrt{\frac{r}{g}} \operatorname{sh} \sqrt{rg} l \\ I_1 &= U_2 \sqrt{\frac{g}{r}} \operatorname{sh} \sqrt{rg} l + I_2 \operatorname{ch} \sqrt{rg} l \end{aligned} \right\} \quad (39)$$

здесь r — сопротивление одной нитки рельсовой колеи,
 g — проводимость между рельсом и почвой,
 l — длина измеряемого участка рельсовой колеи в км.

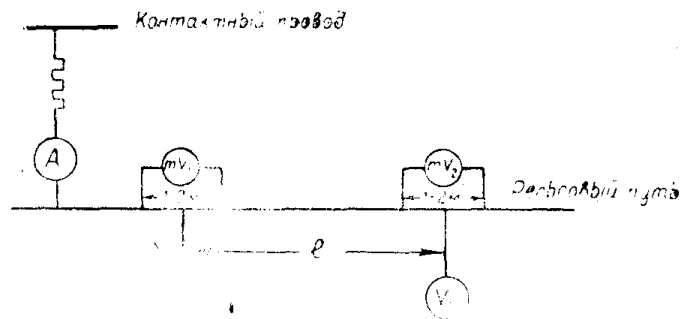


Рис. 6. Измерение переходного сопротивления от рельс к почве по методу проф. Р. Подольского.

Приведем уравнения (39) к несколько другому виду. Обозначим

$$\sqrt{rg} = p,$$

тогда

$$\sqrt{\frac{r}{g}} = \frac{r}{p} = \frac{p}{g},$$

уравнения (39) примут следующий вид:

$$U_1 = U_2 \operatorname{ch} pl + \frac{I_2 p}{g} \operatorname{sh} pl$$

или

$$\frac{I_2 p}{g} \operatorname{sh} pl = U_1 - U_2 \operatorname{ch} pl \quad (40)$$

и

$$I_1 = U_2 \frac{g}{p} \operatorname{sh} pl + I_2 \operatorname{ch} pl.$$

Умножим обе части последнего уравнения на $\frac{p}{g} sh pl$; тогда оно примет следующий вид:

$$\frac{I_1 p}{g} sh pl = U_2 sh^2 pl + \frac{I_2 p}{g} sh pl ch pl.$$

Подставим в это уравнение вместо $\frac{I_2 p}{g} sh pl$ его значение из первого уравнения (40)

$$-\frac{I_1 p}{g} sh pl = U_2 sh^2 pl + U_1 ch pl - U_2 ch^2 pl = U_1 ch pl - U_2,$$

так как

$$ch^2 pl - sh^2 pl = 1.$$

Таким образом, в результате преобразований получим следующую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{I_2 p}{g} sh pl &= U_1 - U_2 ch pl \\ \frac{U_1 p}{g} sh pl &= U_1 ch pl - U_2 \end{aligned} \right\} \quad (41)$$

Для получения значения R_g вычтем первое уравнение из второго

$$\frac{(I_1 - I_2) p}{g} sh pl = (U_1 + U_2)(ch pl - 1),$$

отсюда

$$g = \frac{(I_1 - I_2) p sh pl}{(U_1 + U_2)(ch pl - 1)}$$

или

$$R_g = \frac{(U_1 + U_2)(ch pl - 1)}{(I_1 - I_2) p sh pl}.$$

Так как основные уравнения (39) были нами составлены для одной рельсовой нитки, фактически же их в схеме Ohio Brass не одна, а две, и так как, далее, в схеме, ток утечки проходит через два последовательно соединенных сопротивления R_g , очевидно, для рассматриваемой нами схемы, получившийся для R_g результат надо разделить на 4, т. е.

$$R_g = \frac{(U_1 + U_2)(ch pl - 1)}{4(I_1 - I_2) p sh pl}. \quad (42)$$

Для приближенного определения R_g разложим $ch pl$ и $sh pl$ в ряд, причем при разложении $ch pl$ пренебрегаем всеми членами ряда, начиная с третьего, а при разложении $sh pl$,—начиная со второго, тогда

$$ch pl \approx 1 + \frac{p^2 l^2}{2}$$

и

$$sh pl \approx pl.$$

Если подставить в уравнение (42) полученные значения для $ch pl$ и $sh pl$, переходное сопротивление от рельс к почве приближенно может быть выражено

$$R_g \approx \frac{U_1 + U_2}{8(I_1 - I_2)} l \Omega \text{ км} \quad (42a)$$

Так как пренебрежение при разложении $ch pl$ и $sh pl$ в ряд членами: в первом случае, начиная с третьего, и во втором, начиная со второго, влечет определенную погрешность, которая увеличивается с увеличением значения pl , на рис. 7 приведен график поправок, которые необходимо вносить при вычислении R_g .

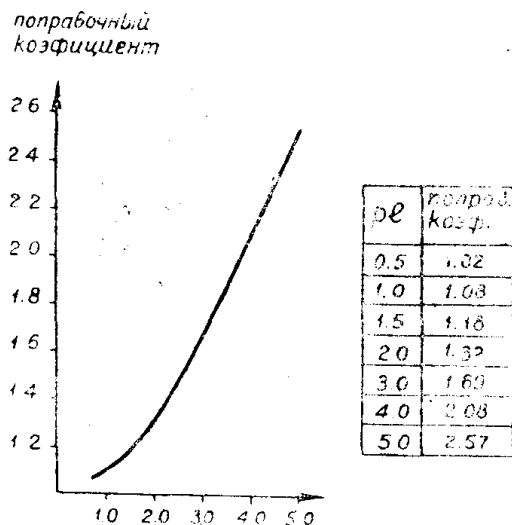


Рис. 7. Кривая поправок при определении переходного сопротивления и сопротивления рельсовой колеи по методу "Ohio Brass".

При определении переходного сопротивления полученный по формуле "Ohio Brass" результат следует разделить на поправочный коэф., соответствующий значению pl . При определении сопротивления рельсовой колеи результат надо умножить на поправочный коэффициент.

Вычисление R_g необходимо производить следующим образом. Прежде всего определяем величину pl , для чего уравнения (41) разделим одно на другое. После сокращений получим

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{U_2 - U_1 ch pl}{U_1 ch pl - U_2}$$

откуда получим

$$ch pl = \frac{U_1 I_1 + U_2 I_2}{U_1 I_2 + U_2 I_1} \quad (43)$$

Зная из опыта все входящие в это выражение величины и пользуясь таблицами гиперболических функций, находим pl и, следовательно, соответствующий поправочный множитель по графику рис. 7.

Точно так же поступаем и при определении сопротивления рельсовой

колеи. Сложим оба уравнения (41), заменив предварительно $\frac{p}{g}$ через $\frac{r}{p}$.

Получим

$$\frac{(I_1 + I_2)r}{p} sh pl = (U_1 - U_2)(ch pl + 1)$$

или

$$r = \frac{(U_1 - U_2)p(ch pl + 1)}{(I_1 + I_2) sh pl}$$

принимая во внимание, что в схеме Ohio Brass рельсовые нитки соединены последовательно, действительное сопротивление однопутной линии, состоящей из 2 ниток, очевидно, будет в 4 раза меньше, т. е.

$$R_p = \frac{1}{4} \frac{U_1 - U_2}{I_1 + I_2} \frac{p(ch pl + 1)}{sh pl} \quad (44)$$

Для приближенного определения R_g опять-таки разложим $ch pl$ и $sh pl$ в ряд, причем при разложении $ch pl$ пренебрежем и вторым членом ряда. Тогда

$$R_p \approx \frac{U_1 - U_2}{2(I_1 + I_2)l} \Omega/\text{км.}$$

Порядок вычисления R_p такой же, как и при вычислении R_g .

Методом проф. Подоског¹⁰, как было указано выше, можно определять только переходное сопротивление от рельс к почве, причем значение этого сопротивления определяется по формуле:

$$R_g = \frac{U_1 + U_2}{2(I_1 - I_2)} l \Omega/\text{км.} \quad (45)$$

Для вывода этой формулы представим схему проф. Подоского в следующем виде (рис. 8). Для этой схемы, очевидно, можно написать следующие уравнения:

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= I + I_{g1} + I_{g2}, \\ I_{g1} &= U_1 \frac{g}{2}, \\ I_{g2} &= U_2 \frac{g}{2}; \end{aligned} \right\} \quad (46)$$

складывая второе и третье уравнения, получим

$$I_{g1} + I_{g2} = (U_1 + U_2) \frac{g}{2}$$

или, заменяя

$$I_{g1} + I_{g2} \text{ через } I_1 - I_2,$$

получим

$$g = \frac{2(I_1 - I_2)}{U_1 + U_2}.$$

Искомое сопротивление R_g , очевидно, будет

$$R_g = \frac{U_1 + U_2}{2(I_1 - I_2)}.$$

3. Характеристика методов Ohio Brass и проф. Подоского. Экспериментальное определение параметров рельсовой цепи, произведенное на рудниках в Темир-Тау и Салаире, Новосибирской области, позволило сделать следующие выводы в отношении достоинств и недостатков обоих методов.

Метод проф. Подоского, хотя и не требует разбалчивания стыков, далее—не требует как будто наличия постороннего источника тока, так как, казалось бы, вполне возможно использовать токи, протекающие в

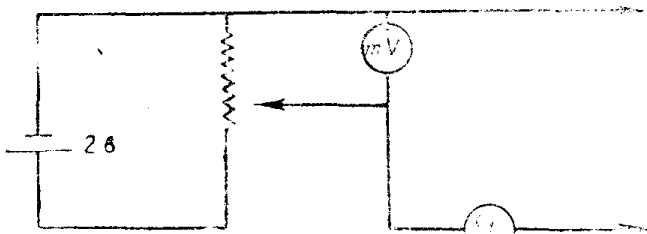


Рис. 8-а. Схема для измерения рельсовых токов.

рельсовой колеи, однако это только кажется на первый взгляд. Даже при создании искусственного режима в рельсовой цепи помощью реостата результаты измерений получаются совершенно неприемлемыми в силу того, что тяговые токи, налагаясь на токи, создаваемые при искусственном режиме, совершенно искажают результаты. Для устранения этого дефекта можно было бы производить два замера: первый при отключенном реостате и второй при включенном реостате, но эти замеры надо производить через очень короткий промежуток времени и одновременно. Второй еще более существенный дефект рассматриваемого метода кроется в специфичности рудничных условий. Для измерения потенциала двух точек рельсовой колеи относительно „земли“ необходимо штырь забивать от рельса на расстоянии минимум 20—30 м, чего по условиям шахты сделать нельзя. Исключить же получающуюся при забивке штыря на расстоянии всего 1 м от рельса погрешность нельзя, так как в формулу для определения R_g входит сумма $U_1 + U_2$, а не их разность. Третий недо-

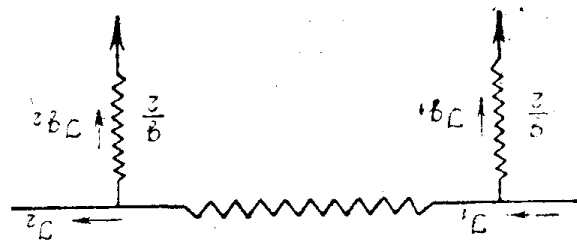


Рис. 8. Эквивалентная схема измерения сопротивления от рельс к почве по методу проф. Р. Подоского.

статок метода проф. Подоского — необходимость иметь чувствительные вольтметры для замеров U_1 и U_2 и с большим внутренним сопротивлением, так как сопротивление растеканию электрода является добавочным сопротивлением к вольтметру и, таким образом, может сильно влиять на точность показаний вольтметра, если последний взят с малым внутренним сопротивлением. Наконец, большое влияние на точность замеров оказывают переходные сопротивления контактов при измерении разности напряжений на сравнительно небольшом участке рельсовой цепи (1—2 метра) — эти сопротивления по своей величине соизмеримы с сопротивлением участка рельса.

Впрочем, этот дефект легко устраним либо применением специальных зажимов с малым переходным сопротивлением¹⁾, либо применением одной из компенсационных схем. В частности мною в лабораторных условиях применялась схема, указанная на рис. 8-а. Кстати сказать, при изучении распределения токов вдоль рельсовой колеи эта схема, хотя несколько и усложняет процесс замеров, однако может оказать существенную пользу. В силу всех вышеуказанных недостатков метод проф. Подоского для рудничных условий должен быть признан неприемлемым. Во всяком случае помощью этого метода сколько-нибудь надежных результатов получать не удавалось. Метод проф. Подоского может применяться только на поверхностных шахтовых путях.

Метод Ohio Brass не особенно удобен в эксплуатационных условиях, так как требует разбалчивания стыков по обе стороны измеряемого участка. Этим методом совершенно нельзя определять сопротивление рельсовой колеи, если не применять специальных зажимов, имеющих небольшое переходное сопротивление. Это видно не только из тех опытов, которые были произведены мною на рудниках Темир-Тау и Салаира, но и из опытов доц. Озерного (см. „Уголь“ № 150), который получил для сопротивления рельсовой колеи значения порядка от 0,84 до 320 $\Omega/\text{км}$ при рельсе типа Н-91 (сопротивление без стыков однопутного двухниточного пути равно 0,047 $\Omega/\text{км}$). Доц. Озерной объяснял огромное расхождение в результатах — недостаточно хорошим изолированием измеряемого участка. Между прочим, при другом методе измерения сопротивления рельсовой колеи на этих же участках он получал более вероятные результаты — сопротивление стыка в самом худшем случае равнялось сопротивлению 20 м сплошного рельса. Расхождение в результатах кроется в самом методе измерений. При измерении таких малых величин, как сопротивление рельсовой колеи нельзя пренебрегать сопротивлением подводящих проводов и переходным сопротивлением контактов. Эти сопротивления в рудничных условиях могут оказаться больше сопротивления самой рельсовой колеи.

В силу этих соображений сопротивление рельсовой колеи надежнее измерять или методом мостика (описание см. в статье инж. Лившиц, „Блуждающие токи в рудниках при откатке контактными электровозами“, Горный журнал № 1, 1930 г.) или одним из приближенных методов, рекомендованных С. Michalke в его статье „Streustrommessungen“ ETZ 1926, стр. 5.

Измерение переходного сопротивления от рельс к почве по методу Ohio Brass дает сравнительно удовлетворительные результаты.

Следует, однако, указать, что в практике повседневного наблюдения за блуждающими токами в условиях шахт все же целесообразнее переходить к так называемым косвенным методам определения как переходного

¹⁾ В качестве такого зажима, имеющего переходное сопротивление всего 0,001 Ω , можно рекомендовать зажим, описанный в книге инж. Л. Н. Пономаренко. „Рельсовые цепи переменного тока“, 1933.

го сопротивления от рельс к почве, так и самого сопротивления рельсовой колеи.

Основной недостаток косвенных методов заключается в том, что эти методы не дают искомым параметров рельсовой цепи на каждом даже небольшом участке, что иногда очень важно (напр., для участков вблизи динамитных складов). Кроме того, косвенные методы требуют знания законов распределения токов вдоль рельсовой колеи при „конечной“ длине последней, эти же законы пока сформулировать достаточно точно нельзя.

4. Распределение токов в рельсовой цепи и приближенное определение падения напряжения в ней при проектировании. E. Dell'Arciprete в своей статье „Il binario come conduttore di ritorno nella trazione elettrica“¹⁾ дал следующую картину распределения токов вдоль рельсовой колеи (рис. 9) для двух случаев, а именно:

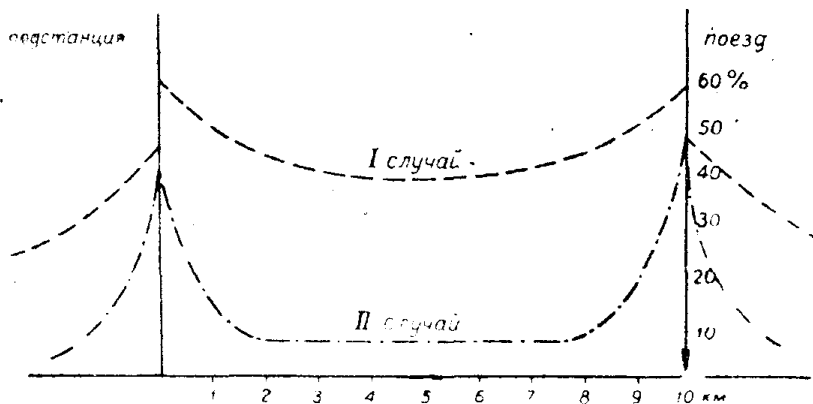


Рис. 9. Распределение токов в рельсовой цепи по Delle'Arciprete. Полный поезда (100%) отложен по оси ординат.

I случай: сопротивление рельсовой колеи $r_p = 0,03 \text{ } \Omega/\text{км}$, переходное сопротивление от рельс к почве $r_z = 0,8 \text{ } \Omega/\text{км}$, следовательно $p = 0,194$.

II случай: $r_p = 1,0 \text{ } \Omega/\text{км}$, $r_z = 0,8 \text{ } \Omega/\text{км}$, $p = 1,12$. В обоих случаях расстояние от поезда до подстанции $l = 10 \text{ км}$.

Как видно из рис. 9, картина токов в рельсовой цепи резко меняется в зависимости от $\frac{pl}{2}$. Для первого рассмотренного Dell'Arciprete случая

$\frac{pl}{2} = 97$ — ток как на участке *AB*, так и на участке *BC* спадает медленно,

в то время как во втором случае $\left(\frac{pl}{2} = 5,6\right)$ на обоих участках ток спадает круто.

Между прочим, совершенно такая же картина получилась и на тех моделях, которые были построены мною при изучении распределения токов в рельсовой цепи. Модель была построена следующим образом: вместо рельса было взято 3 м медного провода $d = 1,6 \text{ мм}$, 3 метра провода имеют сопротивление $0,026 \text{ } \Omega$. Если принять, что сопротивление 1 км двуточечной колеи, выполненной рельсом тяжелого рудничного типа, равно $0,028 \text{ } \Omega/\text{км}$, то масштаб для длин будет, примерно, равен $1/3000$, т. е. 3 м модели соответствуют 1 км рельсового пути $\left(\frac{0,084}{0,026} = 3\right)$.

¹⁾ Журнал „L'elettrotecnica“ от 25 сентября 1928 г.

В качестве переходных сопротивлений было принято 60 катушек из манганинового провода длиной 43 см каждая ($d=0,4$ мм). Сопротивление одной катушки составляет 1,56 Ω , следовательно, всех 60 катушек $\frac{1,56}{60} = 0,026 \Omega$. Таким образом, для изготовленной модели $p=1$.

Распределение токов на модели получилось следующее (таблица 4).

Таблица 4

Таблица распределения токов в рельсовой цепи на модели $p=1$

В сторону от поезда по направлению к тяговой подстанции		От поезда в сторону конца рельсового пути	
Расстояние от поезда в метрах	Ток в % от поездного	Расстояние от поезда в метрах	Ток в % от поездного
25	84.5	25	5.0
167	81.5	50	4.3
642	90.0	133	2.9
675	94.5		
у подстанции 742	100.0		

Для модели $p=15$ были получены следующие данные (табл. 5).

Таблица 5

Таблица распределения токов в рельсовой цепи на модели $p=15$

От поезда к подстанции		От поезда к концу рельсового пути	
Расстояние от поезда в метрах	Ток в % от поездного	Расстояние от поезда в метрах	Ток в % от поездного
25	50.0	25	40
100	20.2	100	16.5
200	10.1	175	2.6
300	5.0		
850	5.0		
950	10.1		
1050	15.2		
1150	37.9		

Картина распределения тока, полученная на моделях, приведена на рис. 10 и 11.

Графическая зависимость между отношением токов $\frac{I_2}{I_1}$ и pl как для случая „бесконечной“ рельсовой цепи, так и для „конечной“, дана на рис. 12, причем для последнего случая расстояние a от поезда, на котором ток в рельсовой цепи почти исчезает, принято 200 м.

Законы, выведенные Dell' Arciprete, неоднократно проверялись и на наших магистральных ж. д. и всюду подтверждались с достаточной для практики точностью. Для шахтных условий эти законы полностью не подтвер-

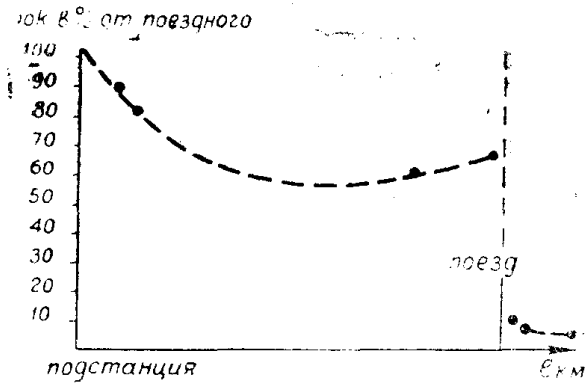


Рис. 10. Распределение токов в рельсовой цепи (модель: $r = 1$, $l = 0.75$ км).

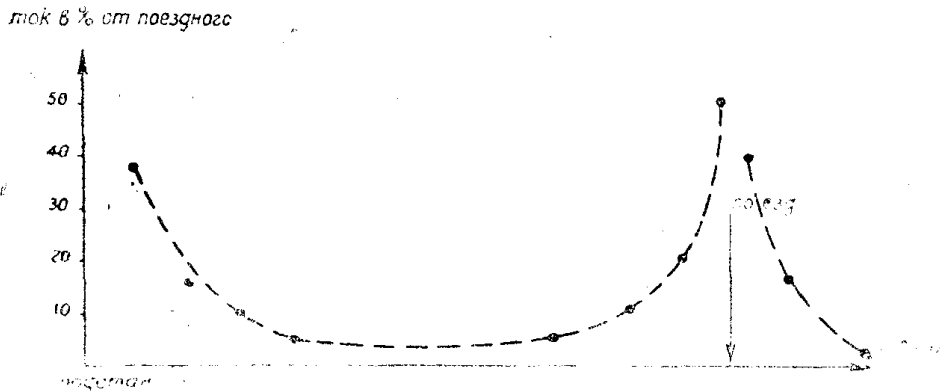


Рис. 11. Распределение токов в рельсовой цепи (модель: $r = 15$, $e = 1.25$ км).

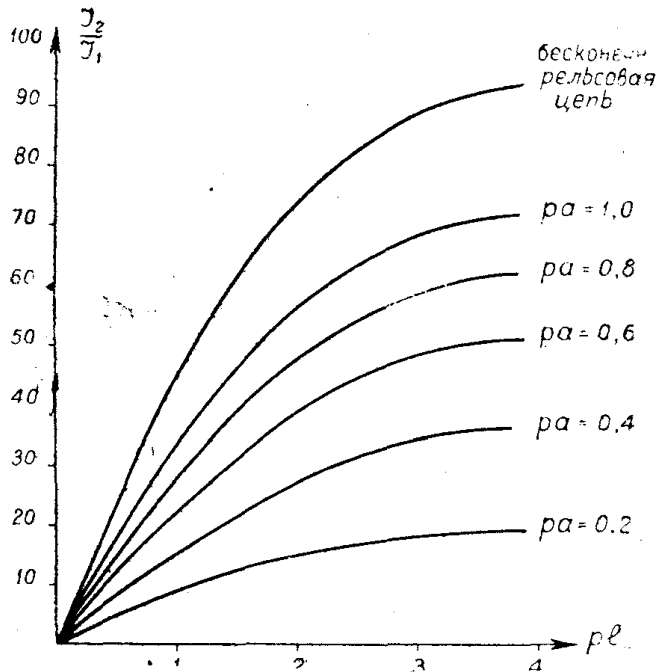


Рис. 12. Зависимость $\frac{J_2}{J_1}$ от rl при различных ra и для бесконечной рельсовой цепи. Примечание: $a = 0,2$ км.

ждаются, необходимо вносить поправки на „конечную“ длину рельсовой цепи. Формулы, выведенные для этого случая в настоящей работе, пока не совсем точно подтверждаются на опыте, но они безусловно ближе отвечают действительности, чем формулы, данные Dell' Arciprete.

Для наиболее опасного, с точки зрения преждевременного выпала шпуров, участка *BC* можно предложить следующий приближенный метод проверки рельсовой цепи.

Как видно из предыдущего, ток I_2 в рудничных условиях всегда значительно меньше половины поездного тока даже при самом плохом состоянии рельсового пути. Действительно, мы видели, что ток

$$I_2 = \frac{\text{th path } \frac{pl_1}{2}}{1 + \text{th path } \frac{pl_1}{2}} I_0.$$

Задаваясь значением $a = 200$ м и различными значениями p и l , получим, что только при $p = 20$ ток I_2 будет равен половине поездного тока. Если взять рудничный рельс типа *H-91* и принять, что благодаря плохому состоянию стыков сопротивление рельсовой колеи будет в 3 раза больше нормального, т. е. $r_p = 0,047 \cdot 3 = 0,14$ $\Omega/\text{км}$, то для этого случая переходное сопротивление от рельс к почве

$$r_s = \frac{r_p}{p^2} = \frac{0,14}{20^2} = 0,0007 \text{ } \Omega \text{ км.}$$

Между тем, даже в самом худшем случае переходное сопротивление значительно выше. По опытам доц. Озерного („Уголь“, 1938 г., № 150) в самом худшем случае $r_s = 0,0047$ $\Omega/\text{км}$.

Таким образом, принимая для I_2 значение, равное половине поездного пускового тока, мы вносим определенный запас при определении падения напряжения на участке *BC*, последнее может быть принято

$$U_{BC} = \frac{1}{2} I_{\text{пуск}} r_p l_{BC}; \quad (47)$$

здесь под r_p принято сопротивление рельсовой колеи без учета шунтирующего влияния почвы, что опять-таки дает некоторый запас при определении U_{BC} . Согласно „норм“, это падение напряжения не должно быть больше 2,5 в/км. Необходимо все же отметить, что правильность последней нормы (и совершенно справедливо) оспаривается некоторыми авторами, в частности доц. Озерным (см. „Уголь“, 1938, № 150).