

шими за величини нормальних напружень. Виконані дослідження впливу кількості тросів в канаті на його НДС в тілі бобіни показують, що збільшення кількості тросів практично не впливає на екстремальні значення напружень та деформацій в напрямку осі y . Зростають деформації в напрямку осі x (поширення зразка), внаслідок зростання ширини каната при зростанні кількості тросів в ньому.

Висновки. Нерівномірний тиск верхнього шару меншої ширини на шари каната, намотаного на барабан, призводить до нерівномірного напружено-деформованого стану плоского каната ступінчастої конструкції підйомних машин для надвеликих глибин. В тілі бобіни виникають дотичні напруження, менші за нормальні, які не можуть спричинити намотаним тілом бобіни телескопічної форми. Незначні дотичні напруження свідчать про припустимість розгляду тіла бобіни, як суцільного тіла. Нерівномірний тиск збільшує відхилення твірної поверхні намотування від прямої лінії. Таке відхилення може сприяти втраті форми тіла бобіни через можливу зміну кінематики процесу намотування каната, коли канат починає намотуватися не за спіраллю Архімеда, а за конічною гвинтовою лінією. При такому намотуванні канат може набувати телескопічної форми. Упередити кінематичну втрату форми каната в тілі бобіни має його спеціальна конструкція.

Список літератури

1. Колосов Л.В. Научные основы разработки и применения резинотросовых канатов подъемных установок глубоких рудников. – Дис... докт. наук: 05.05.06, 01.02.06. – Днепропетровск, 1987. – 426 с.
2. Бельмас И.В. Научные основы теории и расчета резинотросовой ленты конвейера с учетом его пространственной формы: Дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.06, 01.02.06. – Днепропетровск, 1993. – 360 с.
3. Колосов Д.Л. Обоснование параметров и конструкций двухслойных резинотросовых конвейерных лент для горных предприятий. Дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06. – Днепропетровск, 2002. – 164 с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Блохіним С.Є.
Надійшла до редакції 02.11.10*

УДК 622.6:622.33.012.2

© А.Я. Рибалко

ВЛИЯНИЕ НА АКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ МНОГОПРОВОЛОЧНОГО ПРОВОДА СПЛОШНОГО СЕЧЕНИЯ ЭФФЕКТА БЛИЗОСТИ И ПОВЕРХНОСТНОГО ЭФФЕКТА

Проанализированы взаимосвязи показателей конструкции, геометрических размеров, формы сечения и электрические характеристики (омическое и активное сопротивления) многопроводного провода сплошного сечения для тяговой сети системы электроснабжения передвижных потребителей при частоте 4 – 10 кГц. Предложены базовые решения для исключения поверхностного эффекта и эффекта близости.

Проаналізовані взаємозв'язки показників конструкції, геометричних розмірів, форми перетину і електричні характеристики (омічний і активний опори) багатопровідного проводу суцільного перетину для тягової мережі системи електропостачання пересувних споживачів при частоті 4 – 10 кГц. Запропоновані базові рішення для виключення впливу поверхневого ефекту і ефекту близькості.

Intercommunications are analysed of indexes of construction, geometrical sizes, forms of section and electric descriptions (omicheskoe and active resistances) of multiwire wire of continuous section for the hauling network of the system of elektrosnabgeniya of movable users at frequency 4 – 10 kGts. The base solutions are offered for the exception of superficial effect and effect of closeness.

В системах электроснабжения с индуктивной передачей энергии передвижным потребителям на участках их питания используют открытые двухпроводные сети из многопроволочного провода. В рассматриваемом диапазоне частот 4 – 10 кГц существует значительное превышение длины электромагнитной волны над размерами двухпроводной тяговой сети, поэтому анализируем параметры тяговой сети как сосредоточенные [1]. Вдоль проводов двухпроводной тяговой сети распространяется поперечная электромагнитная волна (ТЕМ-волна) [6]. Составляющие плоскую электромагнитную волну векторы напряженности электрического поля \vec{E} и магнитного поля \vec{H} зависят от одной пространственной координаты и времени. Векторы перпендикулярны друг другу и лежат в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны.

В передаче энергии большую роль играют частота изменения электромагнитного поля, конструкция сечения проводов и самой тяговой сети. В тяговой сети имеют место наибольшие потери энергии и ставится задача выбора вида сечения, конструкции и размеров провода для тяговой сети для их снижения [2, 3].

При условии постоянного значения тока в сети уровень потерь энергии обуславливается электрическим сопротивлением провода. Снижение роста активного сопротивления от уровня частоты достигается изменением конструкции и формы сечения провода для исключения поверхностного эффекта и эффекта близости.

Если рассматривать проводящий слой провода с неизменным сечением S_0 , которое заполнено N элементарными проволочками, то здесь возможны следующие оценки проявления поверхностного эффекта и эффекта близости в зависимости от формы сечения и конструкции провода (d – диаметр его сечения) [4,5]:

– сплошное проводящее сечение провода образуют N изолированных цельных проволочек. Увеличение его активного сопротивления за счет поверхностного эффекта такое же, как и для одной проволочки;

– проводящий слой провода имеет цельное трубчатое сечение (внутренний радиус $r_{вн}$; внешний радиус $r_{нп}$). Увеличение активного сопротивления от поверхностного эффекта определяем по аргументу $r_{экв} \equiv d/2 = \sqrt{S_0/\pi}$;

– если трубчатый проводящий слой провода выполнен проволочками без изоляционного покрытия, то его эквивалентно представляем сплошным сечени-

ем с диаметром $d_{экв} = d_{np} \sqrt{N} = 2\sqrt{s_0/\pi}$ и оцениваем по этому аргументу увеличение активного сопротивления;

– для трубчатого проводящего слоя провода из изолированных проволок относительное увеличение активного сопротивления от поверхностного эффекта будет таким же, как и для одной проволоки.

Оценим количественно проявление добавочных потерь энергии в указанных конструкциях многопроволочного провода. Для этого проанализируем взаимосвязь показателей конструкции, геометрических размеров и электрических характеристик (омическое и активное сопротивления) многопроволочного провода для тяговой сети системы электроснабжения подвижных потребителей.

Анализ активного сопротивления многопроволочного провода сплошного сечения можно выполнить распространяя полученные в [8] аналитические зависимости для элементарной проволоки на сечение многопроволочного провода, где необходимо учесть:

- заполнение N проволочками сечения $s_0 = \pi r_0^2 = \pi d_{np}^2 N / (4p)$, где p – коэффициент заполнения сечения провода проволочками с диаметром d_{np} ;
- изменение напряженности магнитного поля в сечении провода;
- изменение плотности потерь энергии в сечении провода.

Предварительно приводим рассмотренные характеристики к единице площади сечения, а затем перейдем к сечению провода. Количество проволок, приходящихся на единицу поперечного сечения провода, будет характери-

зовать коэффициент приведения $k_s = \frac{N}{\pi r_0^2} = \frac{4p}{\pi d_{np}^2}$. Тогда для приведения площади $2\pi r dr$ элементарного кольца к площади кольца из проволок используем выражение

$$ds_k = k_s 2\pi r dr \rightarrow ds_k = \frac{8p}{d_{np}^2} r dr \quad (1)$$

В сечении провода напряженность магнитного поля в точке, отстоящей от его центра на расстоянии $r < r_0$, согласно работе [6]

$$\bar{H}(r) = \frac{i}{2\pi r_0} \cdot \frac{J_1(j^{3/2}rk)}{J_0(j^{3/2}r_0k)} \quad (2)$$

где $k = \sqrt{\omega\gamma\mu_0\mu_r}$; ω – угловая частота колебаний электромагнитного поля, создаваемого током в проводе; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная; μ_r – относительная магнитная проницаемость; γ – удельная проводимость материала

ла провода; $J_0(j^{3/2}kr_{np}), J_1(j^{3/2}kr)$ – функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядков с мнимым аргументом $(j^{3/2}r\sqrt{\omega\gamma\mu_0\mu_r})$ [7].

Плотность потерь энергии, с использованием из [8] уравнения

$$P_{np, \text{бл}} = \frac{I_{np}^2 k^2}{2\pi r_{np}^2 \gamma \left[\text{ber}^2(kr_{np}) + \text{bei}^2(kr_{np}) \right]} \cdot L(kr)$$

где интеграл Ломмеля

$$L(kr) = \int_0^{r_{np}} \left[\text{ber}_1^2(kr) + \text{bei}_1^2(kr) \right] \cdot r \cdot dr$$

и с учетом выражения (2), определим как

$$\frac{d}{ds} P_{np, \text{бл}} = \frac{\frac{2k^2 I^2}{\gamma \pi^2 d_{np}^2 r_0^2} \left\{ \int_0^{r_{np}} \left[\text{ber}_1^2(kr) + \text{bei}_1^2(kr) \right] \cdot r \cdot dr \right\} \cdot \left[J_1(j^{3/2} \cdot rk) \right]^2}{\left[\text{ber}^2\left(\frac{d_{np}}{\Delta\sqrt{2}}\right) + \text{bei}^2\left(\frac{d_{np}}{\Delta\sqrt{2}}\right) \right] \left[\text{ber}_1^2\left(\frac{\sqrt{2}r_0}{\Delta}\right) + \text{bei}_1^2\left(\frac{\sqrt{2}r_0}{\Delta}\right) \right]} \quad (3)$$

Интегрирование последнего выражения (3), с учетом выражения (1) для левой части в пределах $[0; s_0]$ и для правой части в пределах $[r_{np}; r_0]$ позволяет определить составляющую потери энергии в сечении провода, где выделяем прирост от эффекта близости активного сопротивления провода к омическому сопротивлению, т.е.

$$\frac{R_{\text{ол}}(k, r_{np}, r_0)}{R_{y\text{д},=}(r_0)} = L(kr) \cdot \int_{r_{np}}^{r_0} \left[\text{ber}_1^2(kr) + \text{bei}_1^2(kr) \right] r C_{\text{ол}}(d_{np}, r_0) dr \quad (4)$$

Здесь введен коэффициент

$$C_{\text{ол}}(d_{np}, r_0) = \frac{k^6 p}{\pi} \frac{1}{\left(\frac{d_{np}}{\Delta\sqrt{2}}\right)^4} \cdot \frac{1}{\left[\text{ber}^2\left(\frac{d_{np}}{\Delta\sqrt{2}}\right) + \text{bei}^2\left(\frac{d_{np}}{\Delta\sqrt{2}}\right) \right] \left[\text{ber}_1^2\left(\frac{\sqrt{2}r_0}{\Delta}\right) + \text{bei}_1^2\left(\frac{\sqrt{2}r_0}{\Delta}\right) \right]}$$

Выполнив замену переменной $k = \sqrt{2}/\Delta$ (здесь $\Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\gamma\mu_0\mu_r}}$ – глубина проникновения электромагнитной волны в проводящую среду), оцениваем изменение зависимости (4) численными методами (см. рис. 1), от основных переменных: конструктивных параметров (диаметра и количества проволок) и

частоты тока. Отмечаем в результате: возрастание активного сопротивления провода с увеличением количества проволок и уменьшением диаметра проволоки; в целом проявление эффекта близости на частоте 5 кГц относительно небольшое – до 20 %.

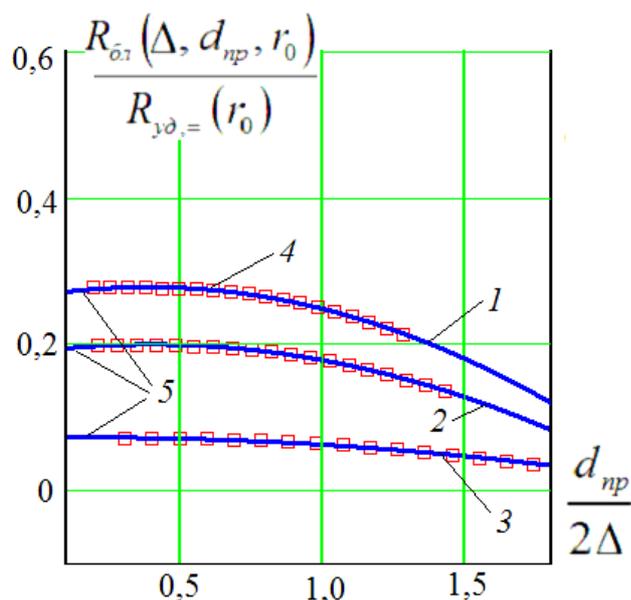


Рис. 1. Кривые аппроксимации прироста активного сопротивления провода сплошного сечения в результате эффекта близости от соотношения диаметра проволоки, глубины проникновения электромагнитной волны и частоты: 1 – 4 кГц; 2 – 5 кГц; 3 – 10 кГц; 4 – расчетные точки; 5 – кривые регрессии

Существует вариация прироста активного сопротивления по аргументу $d_{np} / (2\Delta)$: с повышением частоты и увеличением диаметра проволоки прирост активного сопротивления провода от эффекта близости снижается; темп снижения для каждого уровня частоты свой. Для получения простой оценки аналитической зависимости этого прироста от существенных переменных выполнена аппроксимация графической зависимости рис. 1 с применением полиномиальной регрессии (коэффициент регрессии 0,99) в виде полинома второй степени

$$\frac{R_{01}(\Delta, d_{np}, r_0)}{R_{y d,=} (r_0)} = a_0 + a_1 \frac{d_{np}}{2\Delta} + a_2 \left(\frac{d_{np}}{2\Delta} \right)^2, \quad (5)$$

значения коэффициентов которого сведены в таблице 1.

Таблица 1

Значения коэффициентов полинома (5)

Частота, кГц	a_0	a_1	a_2
4	0,266	0,061	- 0,08
5	0,19	0,047	- 0,059
10	0,072	0,004927	- 0,014

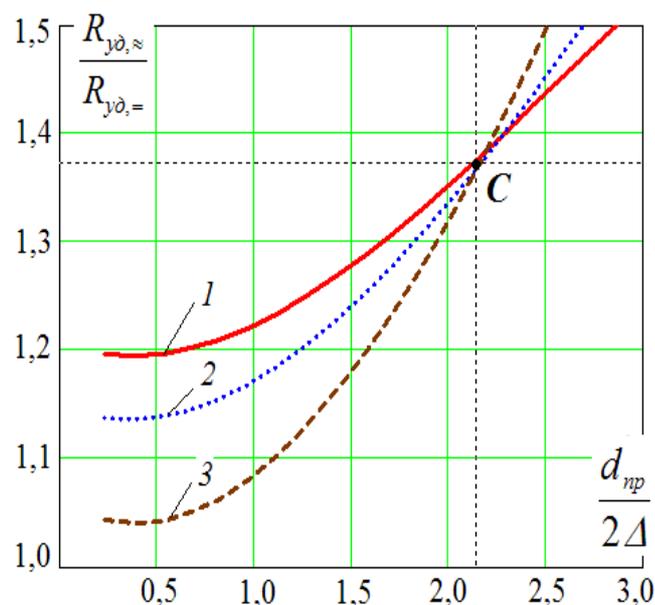


Рис. 2. Кривые зависимости прироста активного сопротивления провода в результате влияния поверхностного эффекта и эффекта близости от соотношения диаметра проволоочки и глубины проникновения электромагнитной волны при частотах: 1 – 4 кГц; 2 – 5 кГц; 3 – 10 кГц

Суммарную оценку увеличения активного сопротивления провода от поверхностного эффекта и эффекта близости $R_{\approx} = R_n + R_{\partial n}$ определяем по отношению к омическому

$$\frac{R_{y\partial, \approx}}{R_{y\partial, =}} = 1,005 + pa_0 + (pa_1 - 0,104) \frac{d_{np}}{2\Delta} + (pa_2 + 0,148) \left(\frac{d_{np}}{2\Delta} \right)^2 - 0,011 \left(\frac{d_{np}}{2\Delta} \right)^3 \quad (6)$$

где $R_{y\partial, =} = 1 / (\pi r_0^2 \gamma p)$ – удельное электрическое, поверхностный эффект.

Для точки С (см. рис. 2) частотная зависимость параметров является одинаковой в рассматриваемом диапазоне частот (прирост активного сопротивления до 38% по отношению к омическому). Соотношение $d_{np} / (2\Delta) < 2,146$ рекомендуется для выбора основных конструктивных параметров многопроволочного провода сплошного сечения.

Таким образом, многопроволочный провод следует выполнять из совокупности изолированных элементарных проводников, которые по длине скручены таким образом, что они последовательно проходят через каждую точку поперечного сплошного сечения используемого провода. При общем заполнении необходимого сечения изолированными элементарными проволоочками с диаметром в пределах $d_{np} \leq 2,3\Delta$ активное сопротивление за счет эффектов вытеснения тока увеличиться на 36 %.

Список литературы

1. Львов А.П. Электрические сети повышенной частоты. – М.: Энергоиздат, 1981. –104 с.
2. Рыбалко А.Я. Оцінка витрати провідникового матеріалу в системі електропостачання безконтактних електровозів // Гірничая електромеханіка та автоматика: Наук. – техн. зб. – 2001. – Вип.67. – С.53–60.
3. Рыбалко А.Я. Снижение расхода проводникового материала в системе электроснабжения бесконтактных электровозов// Горн. информ.-аналит. бюл. – 2003. – №3. – С.207–210.
4. Транспорт с индуктивной передачей энергии для угольных шахт /Г.Г.Пивняк, И.П.Ремизов, С.А.Саратикянц и др.; Под ред. Г.Г. Пивняка. – М.: Недра, 1990. – 245 с.
5. Розенфельд В.Е., Староскольский Н.А. Высокочастотный электрический транспорт. М.: Транспорт, 1978. – 208 с.
6. Математичне моделювання електромагнітних процесів передачі енергії / Г.Г. Півняк, М.Г. Поляков, А.Я. Рыбалко, С.О. Сушко; За ред. акад. НАН України Г.Г. Півняка. – Д.: Національний гірничий університет, 2003. – 145 с.
7. Ватсон Г.Н. Теория бесселевых функций.– М.: Изд-во иностранной литературы, 1949. – Ч.1. – 798 с.
8. Рыбалко А.Я. Провод для сетей тока повышенной частоты. – Гірничая електромеханіка та автоматика: Науч.- техн. зб. – 2010. – Вип.84.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Зайкою В.Т.
Надійшла до редакції 30.10.10*

УДК 504.4.054

© М.П. Рева, А.С. Редчук, Т.К. Макарова

ЕВАПОРИТОВА СЕДИМЕНТАЦІЯ СОЛЕЙ ЗІ СКЛАДНИХ РОЗЧИНІВ ВОДНИХ ОБ'ЄКТІВ КРИВБАСУ

Розглядається процес кристалізації солей при випаровуванні складних сольових розчинів. Рассматривается процесс кристаллизации солей при выпаривании многокомпонентных рассолов.

Process of crystallization of salts at evaporation of multicomponent brines is considered.

Вступ. Основними джерелами забруднення навколишнього середовища при видобуванні та збагаченню залізних руд Кривбасу являються відвали хвостосховища, ставки-накопичувачі, невід'ємною складовою яких є значні обсяги високо мінералізованих вод (до 20 млн. м³ на рік). Мінералізація досягає 30 г/дм³. Фільтрація високо мінералізованих вод в ґрунти, в водоносні горизонти, та скиди в р. Інгулець згубно діють на довкілля.

Зосередженням декількох джерел забруднення в одному місці значно знижується негативний вплив на оточуюче середовище. Для Південного гірничо-збагачувального комбінату – це розміщення хвостосховища «Войково» на відвалі Лівобережний, загальна площа якого складає близько 900 га, а висота – 100 м. Площа поверхні, з урахуванням її грубоуламкової структури, - до 20 млн. м². В теплий період року скальна поверхність відвалу розігрівається (за рахунок сонячної енергії) до 70⁰С, що дозволяє при відповідних режимах зрошення випаровувати значні обсяги високо мінералізованих вод, а надлишки (в зимовий період) акумулювати в тілі відвалу першого ярусу, де обсяг пустот досягає 20 млн. м³.