

Список литературы

1. Правила изготовления взрывозащищенного и рудничного электрооборудования. – М.; Л.; Энергия, 1984 г. – 94 с.
2. Новицкий А. В. Тепловой режим рельсового тормоза шахтного локомотива // Сборник докладов международной научно-технической конференции «Сталий розвиток гірничо-металургійної промисловості», г. Кривий Ріг, 18-22.05.04. – г. Кривий Ріг, 2004. – С.135-140.
3. Иноземцев В.Г. Тепловые расчеты при проектировании и эксплуатации тормозов. – М.: Транспорт, 1966. – 26 с.
4. Беляев Н. М., Рядно Н. А. Методы нестационарной теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1978. 327 с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Блохіним С.Є.
Надійшла до редакції 02.04.2012*

УДК.629.433: 621.315.175

© А.Г. Рудченко

ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС ПРОЦЕССА УДАЛЕНИЯ ЛЬДА С ПРОВОДОВ КОНТАКТНОЙ СЕТИ НАЗЕМНОГО ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА

Отримано рівняння теплового балансу процесу видалення льоду з проводів контактної мережі міського електричного транспорту. Встановлено залежність напруженості магнітного поля від діаметра проводу, часу дії цього поля на визначеній ділянці проводу, товщини льоду, що нагрівається, а також кратності глибини проникнення даного поля.

Получено уравнение теплового баланса процесса удаления льда с проводов контактной сети городского электрического транспорта. Установлена зависимость напряженности магнитного поля от диаметра проводника, времени действия этого поля на определенном участке проводника, толщины нагреваемого льда и кратности глубины проникновения данного поля

The equation of heat balance of the process of removing ice from the contact system wires electric urban transport is received. The dependence of the magnetic field intensity on the diameter of the conductor, the time of action of this field on a particular area of the conductor, the thickness of the heated ice and the multiplicity of the penetration depth of the field is established.

Проблема обледенения металлоконструкций остро возникла при массовом использовании летательных аппаратов и дальнейшем развитии электро-транспорта (железнодорожный транспорт, трамвайно-троллейбусный парк, подвесные дороги и т.д.).

Образования гололеда на проводах контактной сети может привести к следующим последствиям:

- нарушение нормального режима работы электроподвижного состава;
- увеличению экономических убытков предприятий городского электро-транспорта из-за простоев электротранспорта и необходимости ремонта тяговой сети;

- увеличению социальной напряженности и экономическим убыткам на других предприятиях народного хозяйства вследствие массовых опозданий.

В работе [1] было проанализировано основные методы и технические средства по борьбе с обледенением металлоконструкций, и в частности, проводов контактной сети городского электротранспорта, а также определено перспективное направление по решению данной проблемы. Этим направлением является электродинамический метод, на основании которого построено устройство [2], работающее следующим образом: при движении электропоезда в момент встречи на пути обледененной зоны провода включается система управления электроразрядным источником тока, который подает к индуктору с определенной частотой одиночные импульсы тока, следующие один за другим, вызывая вблизи очищаемого провода импульсы электромагнитного поля. Взаимодействие наведенных в проводе токов, вызванных этим полем, и собственных токов в индукторе приводит к созданию в проводе серии бегущих поперечных волн, периодически удаляющих лед на некотором расстоянии впереди индуктора. Так как этот процесс периодически повторяется, то при движении электропоезда с определенной скоростью обеспечивается непрерывная очистка обледеневшего провода ото льда перед электропоездом.

Данное устройство [2] является перспективным для использования при борьбе с обледенением контактных проводов городского электротранспорта, но имеет ряд недостатков: в зоне влияния устройства удаление льда неравномерное, а применение электроразрядного источника тока приводит к увеличению энергетических затрат.

Авторами работы [3] разработано устройство, работа которого основано на электромагнитном принципе. Переменное электромагнитное поле, взаимодействуя с проводником, который помещен в это поле, наводит в нем вихревые токи. Как следствие происходит равномерный нагрев металлического проводника с подтаянием льда по всей поверхности зоны влияния, что приводит к повышению эффективности удаления льда с контактных проводов при снижении энергетических затрат.

На рис. 1 приведена схема устройства для удаления льда с проводов контактной сети электротранспорта, базирующегося на электромагнитном методе.

Устройство состоит из подковообразного магнитопровода индуктора 1, имеющего воздушный зазор, в котором помещается контактный провод 2. Индуктор закреплен на держателе 3 и прижимается к проводу 2 пружиной 4. Обмотка 5 индуктора изолированным проводом 6 соединена с высокочастотным источником тока 7. На держателе 3, который шарнирно закреплен на токосъемнике 8 транспортного средства 9, после индуктора 1 размещено механическое устройство 10.

Работа данного устройства может быть осуществлена следующим образом. При движении транспортного средства 9, например трамвая, в момент возникновения на пути обледеневшей зоны провода 2 автоматически или вручную на обмотку 5, с помощью высокочастотного источника тока 7, подается переменное напряжение заданной частоты.

Целью данной работы является определение теплового баланса в процессе удаления льда с поверхности провода контактной сети с помощью индуктора переменного электромагнитного поля.

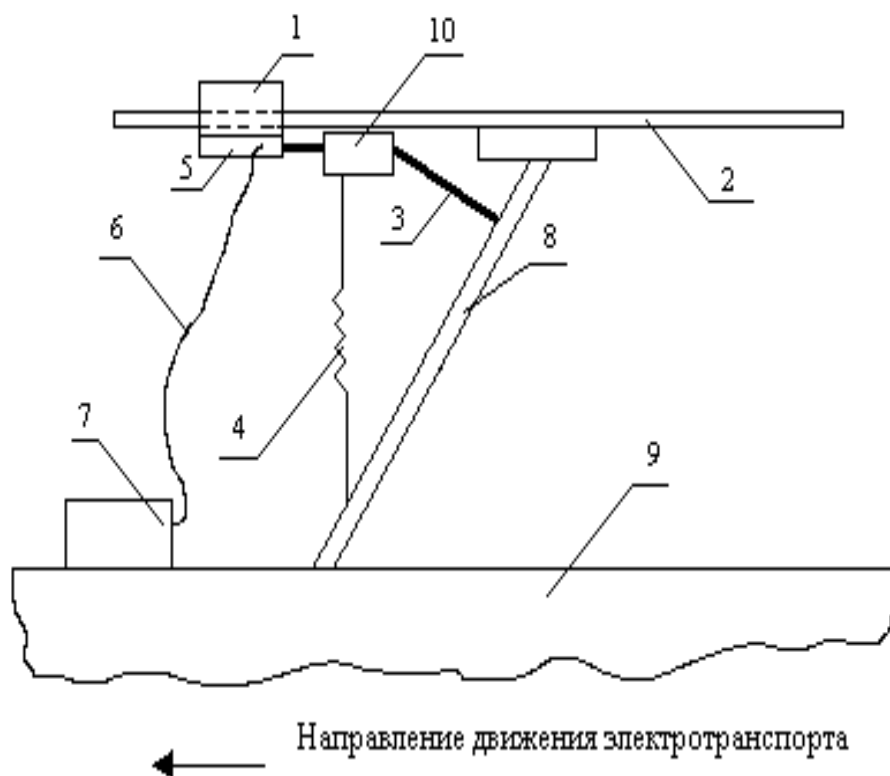


Рис. 1. Схема устройства для удаления льда с проводов контактной сети электротранспорта

Возникновение вихревых токов или токов Фуко сопровождается диссипацией энергии поля, выделяющейся в виде джоулева тепла [4]. Диссипация энергии может быть выражена через полный магнитный момент \vec{M} , приобретаемый проводником в магнитном поле. В периодическом поле магнитный момент тоже есть периодическая функция времени с той же частотой.

Авторы работы [4] приводят выражение для определения диссипации энергии в единицу времени:

$$Q = \frac{V}{2} \omega \alpha''_{ik} \mu_0 \mu H^2, \text{ Дж/с} \quad (1)$$

где $\omega = 2\pi f$ – угловая частота тока, рад/с; f – частота тока в обмотках катушки, Гц; μ – магнитная проницаемость среды (в данном случае проводника); $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Г/м – магнитная постоянная; H – напряженность магнитного поля, А/м; V – объем проводника, м³; α'' – коэффициент пропорциональности диссипации энергии электромагнитного поля.

Необходимое количество тепла для нагрева льда, находящегося на поверхности проводника определяем по выражению:

$$Q_n = m_l c_l (T_k - T_n), \text{ Дж} \quad (2)$$

где m_l – масса льда, который необходимо растопить, кг; c_l – удельная теплопроводность вещества, в нашем случае льда, и равная $2,09 \cdot 10^3$ Дж/кг·К; T_k и T_n – конечные и начальные температуры нагрева, К.

Массу льда, который необходимо нагреть, определяем по выражению:

$$m_{\text{л}} = V_{\text{л}} \rho_{\text{л}},$$

где $\rho_{\text{л}} = 0,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ – плотность льда при 0° ; $V_{\text{л}}$ – объем льда, но не весь находящийся на проводнике, а только тонкая его пленка. Объем рассчитаем следующим образом:

$$V_{\text{л}} = S_{\text{л}} l,$$

где l – длина проводника, находящегося в зоне непосредственного влияния электромагнитного поля индуктора, м; $S_{\text{л}}$ – площадь в сечении ледяной пленки, находящегося вокруг проводника, м^2 . Здесь $S_{\text{л}}$ рассчитывается по формуле $S_{\text{л}} = S'_2 - S_1$, где S'_2 – площадь сечения проводника с учетом толщины пленки льда Δd , S_1 – площадь сечения проводника с диаметром d .

Выше названные площади определяем следующим образом:

а) площадь сечения проводника $S_1 = \frac{\pi d^2}{4}$

б) площадь сечения проводника с учетом толщины пленки льда

$$S'_2 = \pi \left(\frac{d}{2} + \Delta d \right)^2 = \pi \left(\frac{d^2}{4} + d\Delta d + \Delta d^2 \right) = \frac{\pi d^2}{4} + \pi d\Delta d + \pi \Delta d^2$$

в) площадь в сечении ледяной пленки

$$S_{\text{л}} = S'_2 - S_1 = \frac{\pi d^2}{4} + \pi d\Delta d + \pi \Delta d^2 - \frac{\pi d^2}{4} = \pi \Delta d (d + \Delta d)$$

Таким образом, подставляя в уравнение (2) полученные выражения, мы получаем формулу:

$$Q_{\text{н}} = \rho_{\text{л}} l \pi \Delta d (d + \Delta d) c_{\text{л}} (T_{\text{к}} - T_{\text{н}}), \text{ Дж} \quad (3)$$

Кроме того, часть тепловой энергии, образующейся вихревыми токами в индукторе, расходуется на нагрев проводника, но не всего, а только на глубину проникновения магнитного поля:

$$Q_{\text{пр}} = m_{\text{пр}} c_{\text{пр}} (T_{\text{к}} - T_{\text{н}}), \text{ Дж} \quad (4)$$

где $m_{\text{пр}}$ – масса проводника, который непосредственно нагревается, кг; $c_{\text{пр}}$ – удельная теплопроводность вещества, в нашем случае меди, и равная $380 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$; $T_{\text{к}}$ и $T_{\text{н}}$ – конечные и начальные температуры нагрева, К.

Массу проводника, которую нагревает индуктор, определяем по выражению:

$$m_{\text{пр}} = V_{\text{пр}} \rho_{\text{пр}},$$

где $\rho_{\text{пр}} = 8,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ – плотность вещества, а именно меди; $V_{\text{пр}}$ – объем проводника, подверженного нагреву. Объем рассчитаем следующим образом:

$$V_{\text{пр}} = S_{\text{пр}} l,$$

где l – длина проводника, находящегося в зоне непосредственного влияния электромагнитного поля индуктора, м; S_{np} – площадь в сечении проводника, подверженному непосредственному нагреву, м². Здесь S_{np} рассчитывается по формуле $S_{np} = S_1 - S_2''$, где S_2'' – площадь сечения проводника без учета глубины проникновения электромагнитного поля δ , S_1 – площадь сечения проводника с диаметром d .

Выше названные площади определяем следующим образом:

а) площадь сечения проводника без учета глубины проникновения

$$S_2'' = \pi \left(\frac{d}{2} - \delta \right)^2 = \pi \left(\frac{d^2}{4} - d\delta + \delta^2 \right) = \frac{\pi d^2}{4} - \pi d\delta + \pi \delta^2$$

б) площадь в сечении ледяной пленки

$$S_{np} = S_1 - S_2'' = \frac{\pi d^2}{4} - \frac{\pi d^2}{4} + \pi d\delta - \pi \delta^2 = \pi \delta (d - \delta)$$

Таким образом, подставляя в уравнение (4) полученные выражения, мы получаем формулу:

$$Q_{np} = \rho_{np} l \pi \delta (d - \delta) c_{np} (T_k - T_n), \text{ Дж} \quad (5)$$

Следует заметить, что при составлении теплового баланса, будем пренебрегать диффузией тепла на весь диаметр проводника, а также на всю толщину льда и в атмосферный воздух. Кроме того, будем считать, что вся энергия, определяемая уравнением (1) преобразовывается в тепловую полностью.

Таким образом, тепловой баланс, а значит и энергетический, будет иметь следующий вид:

$$Q_n = Qt - Q_{np}, \quad \text{Дж} \quad (6)$$

В выражении (6) t – время, которое введено что бы привести уравнение баланса к единым единицам измерения, т.к. формула (1) дает диссипацию энергии за 1 сек.

Из уравнения (6) можно определить необходимую напряженность магнитного поля, создаваемую индуктором. Для этого в (6) подставим значения количества тепла и энергии, определенные уравнениями (1), (3) и (5). После чего решим полученное выражение относительно напряженности магнитного поля H :

$$H = \sqrt{\frac{2l\pi(T_k - T_n)[\rho_l c_l \Delta d (d + \Delta d) + \rho_{np} c_{np} \delta (d - \delta)]}{V \omega \alpha_{ik}'' \mu_0 \mu t}} \quad (7)$$

Запишем уравнение (7) для нагрева на l К поверхности проводника и тонкого слоя льда, покрывающего проводник, с учетом того, что $V = \frac{\pi d^2 l}{4}$, $\omega = 2\pi f$ и пусть слой льда, который необходимо нагреть, будет пропорционален глубине проникновения магнитного поля $\delta = \frac{d}{\gamma}$, а именно $\Delta d = \frac{\varphi d}{\gamma}$. Здесь

φ – коэффициент пропорциональности. При этом частоту определим по выра-

жению $f = \frac{\rho\gamma^2}{\pi\mu_0 d^2}$ [5].

Таким образом, получим уравнение зависимости напряженности магнитного поля от диаметра проводника, времени действия этого поля на определенном участке проводника, толщины нагреваемого льда и кратности глубины проникновения данного поля:

$$H^* = \frac{2d}{\gamma^2} \sqrt{\frac{\varphi\rho_{л}c_{л}(\gamma + \varphi) + \rho_{нр}c_{нр}(\gamma - 1)}{\rho\alpha_{ik}''t}} \quad (8)$$

Выводы. В процессе определения энергетических затрат и их минимизации при удалении льда с проводов контактной сети наземного городского электротранспорта способом индукционного нагрева получены следующие результат:

1. Установлена зависимость необходимого количества тепла для нагрева льда, находящегося на поверхности проводника от толщины пленки льда.
2. Установлена зависимость расхода тепла на нагрев проводника в зависимости от глубины проникновения электромагнитного поля в проводник.
3. Получено уравнение теплового баланса в системе «индуктор-провод» в процессе удаления льда с проводов контактной сети городского электротранспорта.
4. Получено уравнение зависимости напряженности магнитного поля индуктора от диаметра проводника, времени действия этого поля на определенном участке проводника, толщины нагреваемого льда и кратности глубины проникновения данного поля.

Список литературы

1. В.Н. Лапицкий, А.Г. Рудченко Проблема обледенения проводов контактной сети электротранспорта// Наковий Вісник НГАУ. – 2002. – №6. – с. 91-93.
2. Открытие № 556964 СССР. Устройство для удаления льда с проводов /И.А. Левин (СССР). – Оpubл. 05.05.77, Бюл. № 17// Открытия. Изобр. – 1977. – № 17. – с.140-141.
3. Деклараційний патент на винахід № 56882 А, В60L5/02, H02G7/16// Лапицький В.М., Рудченко А.Г. – Спосіб для видалення льоду з проводів контактної мережі електротранспорту та пристрій для його здійснення. – 15.05.2003. Бюл. № 5.
4. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Электродинамика сплошных сред. – М.: гос. изд-во физ.-мат. литературы, 1959. – 532 с.
5. В.Н. Лаписцкий, А.Г. Рудченко. Минимизация энергетических затрат индуктора, применяемого для удаления льда с проводов контактной сети наземного электротранспорта // Матеріали міжнародної конференції «Форум гірників – 2011» – Д.: Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет», 2011. – С. 54-58

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Колесником В.Є.
Надійшла до редакції 19.03.2012*