



Информация об авторах

Лебедева Ольга Анатольевна – к. т. н., доцент, Ангарский государственный технический университет, e-mail: kravhome@mail.ru

Гозбенко Валерий Ерофеевич – д. т. н., профессор, профессор кафедры «Математика», Иркутский государственный университет путей сообщения, Ангарский государственный технический университет, e-mail: vgozbenko@yandex.ru

Каргапольцев Сергей Константинович – д. т. н., профессор, ректор Иркутского государственного университета путей сообщения, e-mail: kck@irgups.ru

Authors

Ol'ga Anatol'evna Lebedeva – Doctor of Engineering Science, Asst. Prof., Angarsk State Technical University, Angarsk, e-mail: kravhome@mail.ru

Valerii Erofeevich Gozbenko – Doctor of Engineering Science, Prof., Angarsk State Technical University, Irkutsk State Transport University, e-mail: vgozbenko@yandex.ru

Sergei Konstantinovich Kargapol'tsev – Doctor of Engineering Science, Prof., Irkutsk State Transport University, e-mail: kck@irgups.ru

Для цитирования

Лебедева О. А. Оптимизация транспортной сети с учетом оценки качества услуг общественного транспорта / О. А. Лебедева, В. Е. Гозбенко, С. К. Каргапольцев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – Т. 61, № 1. – С. 112–118. – DOI: 10.26731/1813-9108.2019.1(61).112–118

For citation

Lebedeva O. A., Gozbenko V. E., Kargapol'tsev S. K. Optimizatsiya transportnoi seti s uchetom otsenki kachestva uslug obshchestvennogo transporta [Optimization of the transport network taking into account assessment of quality of public transport services]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2019, Vol. 61, No. 1, pp. 112–118. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.1(61).112–118

УДК 621.33

DOI: 10.26731/1813-9108.2019.1(61).118–125

И. О. Лобыцин, О. О. Дёмина

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

Дата поступления: 26 января 2019 г.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСЦИЛЛИРУЮЩЕГО ИК-ЭНЕРГОПОДВОДА В ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИОННЫХ ПАЛЬЦЕВ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ЛОКОМОТИВОВ

Аннотация. В данной статье рассматривается совершенно новая технология восстановления изоляционных элементов электродвигателей тягового подвижного состава на примере изоляционных пальцев кронштейнов щеткодержателей. Представлено моделирование осциллирующего режима теплового воздействия на изоляционный элемент при его равномерном вращении на установке карусельного типа, принцип действия которой также описан в работе. Основным достоинством применения карусельной установки считается выполнение осциллирующего ИК-энергоподвода путем передвижения пальцев по карусели при постоянно включенных источниках излучения, что в свою очередь позволяет исключить пусковые режимы при частых включениях и отключениях, тем самым положительно отражаясь на сроке службы ИК-излучателей и качестве воссоздания тепловой энергии. Использование уравнения энергетического баланса делает возможным определение энергетических потерь в процессе сушки электроизоляционных покрытий при ИК-энергоподводе. В работе приведены формулы нахождения потерь при нагреве пропитанного изоляционного пальца, потерь теплоты в окружающую среду путем конвекции и излучения, а также при удалении растворителя. Показаны геометрические размеры восстанавливаемой поверхности изоляционного пальца, на основании которых находится показатель геометрической характеристики пропитанной изоляции. Наглядно представлены сравнительные графики как непрерывного, так и осциллирующего режимов восстановления изоляции с указанием величин, контролируемых в процессе сушки. Создана математическая модель для определения эффективной скважности импульса работы излучателей и проведен расчет максимальной продолжительности цикла осциллирования. Использование разработанной математической модели позволяет увеличить качество восстанавливаемого изоляционного слоя при депоковом ремонте, что способствует повышению надежности изоляционных элементов электродвигателей локомотивов в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: тяговый электродвигатель, изоляционные пальцы, осциллирующий режим, ИК-энергоподвод, теплое излучение, локомотив.

И. О. Lobytsin, O. O. Demina

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russian Federation

Received: January 26, 2019

MATHEMATICAL MODELING OF THE OSCILLATING MODE OF THE IR-ENERGY SUPPLY IN THE TECHNOLOGY OF RESTORATION OF INSULATING FINGERS OF ELECTRIC MOTORS OF LOCOMOTIVES



Abstract. This article deals with a completely new technology of restoring the insulating elements of electric motors of traction rolling stock, as illustrated by the insulating fingers of the brush holder brackets. It presents a simulation of the oscillating mode of thermal effects on the insulating element rotating uniformly on a carousel installation, whose principle of operation is also described in the paper. The main advantage of using a carousel is the implementation of oscillating infrared power supply by moving fingers around the carousel with radiation sources constantly switched on. This, in turn, excludes starting modes with frequent switching on and off, thereby having a positive effect on the service life of infrared radiating elements and the quality of thermal energy reconstruction. The use of the energy balance equation makes it possible to determine the energy losses in the process of drying insulating coatings with IR energy supply. The paper provides formulas for finding losses during the heat of the impregnated IF; loss of heat to the environment through convection; heat losses to the environment through radiation; removal of solvent. The paper shows the geometrical dimensions of the restored surface of the insulating finger, on the basis of which the index of the geometric characteristics of the impregnated insulation is found. Comparative graphs of both continuous and oscillating modes of insulation restoration with an indication of the values controlled during the drying process are clearly demonstrated. A mathematical model for determining the effective duty cycle of the radiating elements and calculating the maximum oscillation cycle duration has been created. Using the developed mathematical model allows us to increase the quality of the insulating layer being restored during a depot repair, which contributes to increasing the reliability of the insulating elements of locomotive electric motors while in operation.

Keywords: traction motor, insulating fingers, oscillating mode, IR power supply, thermal radiation, locomotive.

Введение

Проблема надежности коллекторных электродвигателей тягового подвижного состава неоднократно обсуждалась на страницах различных изданий. В связи с переоснащением железнодорожного транспорта достаточно новыми электровозами серии «Ермак», «Дончак» и «Синара» обозначилась новая проблема, связанная с надежностью изоляционных пальцев (ИП) кронштейнов щеткодержателей. В графе по отказам элементов коллекторного тягового электродвигателя на ИП приходится 5–10 % отказов, чаще всего они вызваны перекрытием и реже пробоем ИП [1, 2]. Этот фактор указывает на малоэффективные технологии, применяемые в настоящее время при изготовлении и восстановлении ИП.

Применение теплового излучения для восстановления ИП

Технология изготовления и восстановления ИП предусматривает проведение ряда необходимых операций по нагреву восстанавливаемого объекта. При деповском и заводском ремонте данные операции производятся с применением сушильной камеры, специально разработанной для восстановления максимально габаритных элементов тягового электродвигателя локомотива (якорь, остов). Нагрев деталей перед пропиткой, а также процесс сушки осуществляются конвективным способом. Стоит отметить, что в деповских условиях в сушильную камеру с общей мощностью всех нагревателей 100 кВт помещают для нагрева подставки всего лишь с 12–18 пальцами, так как восстанавливать пальцы необходимо за максимально короткие сроки и нет возможности их накопления. Процесс восстановления изоляции длится более 12 ч в соответствии с разработанными на сегодняшний день технологическими картами.

Тщательно исследов существующую технологию ремонта изоляционных конструкций тяго-

вых двигателей, научная группа кафедры электроподвижного состава Иркутского государственного университета путей сообщения предложила локальные технологии восстановления электроизоляционного лакового слоя ИП тяговых электродвигателей локомотивов с применением поочередного воздействия некогерентного и когерентного излучения. В ходе многочисленных экспериментальных исследований было предложено несколько способов и устройств для производства и восстановления ИП с применением когерентных и некогерентных источников теплового излучения [3, 4].

Одной из наиболее перспективных установок является установка карусельного вида (рис.1), позволяющая осуществлять восстановление ИП в осциллирующем режиме ИК-энергоподвода. Эффективность этих режимов установлена для технологий, использующих энергию инфракрасного (ИК) излучения [5].

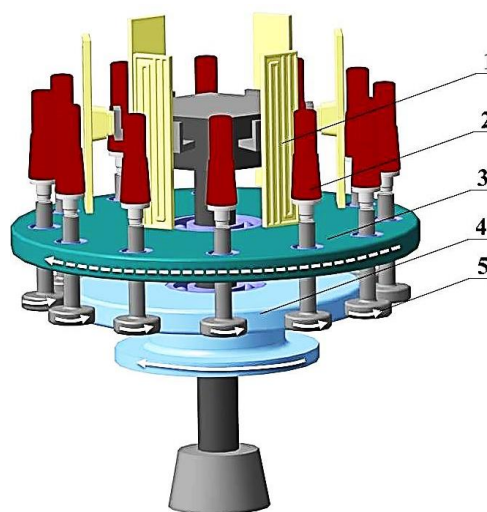


Рис. 1. Общий вид карусельной установки:

- 1 – импульсный керамический ИК-излучатель;
2 – изоляционный палец; 3 – карусель;
4 – привод карусели; 5 – привод изоляционного пальца



В карусельный стол вкручивается комплект ИП для одного шестиполосного тягового электродвигателя. Последовательность технологии восстановления путем нанесения полимера на поверхность ИП с последующей сушкой традиционная. Частотно-регулируемые приводы карусели и ИП независимы друг от друга, что позволяет использовать двойное преобразование Фурье при разработке теории упрочнения ИП тепловым излучением [6–8].

Выявление эффективной скважности периода работы излучателей

На первом этапе построения математической модели воспользуемся дифференциальным уравнением энергетического баланса. Предварительные экспериментальные исследования показали, что наиболее эффективные для этого процесса импульсные керамические излучатели мощностью 500 Вт [9–12].

В случае, когда тепловое излучение воздействует на полимер по одной стороне, элементарная энергия, потребляемая источником излучения за время dt равна

$$dA = P \cdot dt,$$

где P – мощность источника излучения (Вт); τ – время процесса теплового воздействия (с).

При том, что среда между источником излучения и электроизоляционным материалом не поглощает энергию, элементарная энергия, поглощенная полимером за время dt определяется как

$$dA' = \eta \cdot A_\lambda \cdot P \cdot dt,$$

где η – коэффициент полезного действия излучателя; A_λ – поглощательная способность пропиточного электроизоляционного материала.

Расход энергии, поглощенной восстанавливаемым объектом от источника излучения, будет направлен на нагрев пропитанного ИП, потери теплоты в окружающую среду излучением и конвекцией и на удаление растворителя

$$\eta \cdot A_\lambda \cdot P \cdot dt = C \cdot dt + P_k \cdot dt + P_u \cdot dt + P_{исп} \cdot dt,$$

где C – теплоемкость пропиточного электроизоляционного материала (Дж/К); t – температура материала (К).

Величина теплоемкости пропиточного электроизоляционного материала определяется как

$$C = c_{уд} \cdot M,$$

где $c_{уд}$ – удельная теплоемкость изоляции (Дж/К·кг); M – масса изоляции (кг).

Удельная теплоемкость изоляции находится по формуле

$$c_{уд} = \frac{c_{с.в.} \cdot (100 - \omega) + c_v \cdot \omega}{100} = \frac{c_{с.в.} \cdot 100 + c_v \cdot \omega}{100 + \omega},$$

где $c_{с.в.}$, c_v – удельная теплоемкость связующего изоляции и растворителя (Дж/К·кг); ω , u – соответственно относительное и абсолютное содержание растворителя в пропиточном электроизоляционном материале (%).

Тепловые потери $P_k \cdot dt$, которые образуются при конвективном теплообмене между пропиточным изоляционным материалом и окружающей средой, и могут быть вычислены

$$P_k = \alpha_k \cdot F \cdot (t - t_0),$$

где α_k – коэффициент конвективного теплообмена (Вт/К м²); F – площадь при теплообмене (м²); t_0 – температура окружающей среды (К); t – температура изоляционного материала (К).

Тепловые потери P_u , возникающие в результате терморadiационного теплообмена между облучаемым материалом и окружающими поверхностями тел находятся по формуле

$$P_u = \alpha_u \cdot F \left[\left(\frac{t}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_0}{100} \right)^4 \right],$$

где α_u – коэффициент теплообмена излучением (Вт/К·м²).

Мощность, необходимая на удаление растворителя, определяется как

$$P_{исп} = i \cdot r,$$

где i – интенсивность удаления (кг/с); r – скрытая теплота удаления растворителя (Дж/кг).

Для упрощения дальнейших математических преобразований, введем понятие превышения температурного значения электроизоляционного материала над температурным значением окружающей среды, формула при этом имеет вид

$$\theta = t - t_0.$$

Учитывая превышение температуры, запишем уравнение теплового баланса как

$$(\eta \cdot A_\lambda \cdot P - i \cdot r) \cdot dt = C \cdot d\theta + (P_k + P_u + P_{исп}) \cdot dt,$$

Решение данного дифференциального уравнения при помощи метода разделения переменных с некоторыми допущениями позволяет получить следующую формулу:

$$\theta = \theta_{max} \cdot \left(1 - e^{-\tau/T_n} \right) + \theta_{нач} \cdot e^{-\tau/T_n},$$

где T_n – постоянная времени нагрева ИП (с); θ_{max} – максимальное превышение температуры ИП (К); $\theta_{нач}$ – начальное превышение температуры ИП (К).

Скорость нагрева изоляции до предельно допустимой температуры не должна быть выше значения, получаемого при делении предельно допустимой температуры для любого расчетного класса изоляционного материала на величину постоянного времени нагрева

$$V_{\text{пред. доп.}} = \frac{t_{\text{пред. доп.}}}{T_n},$$

где $V_{\text{пред. доп}}$ – допустимая скорость нагрева для класса изоляционного материала (К/с); $t_{\text{пред. доп.}}$ – допустимая температура нагрева для класса изоляционного материала (К); T_n – постоянная времени нагрева ИП (с).

Характеристикой ИП является постоянная времени нагрева, которая, в свою очередь, не зависит от подводимой мощности источника теплового излучения и равна отношению величин теплоемкости тела к величине теплоотдачи

$$T_n = \frac{c_{\text{уд}} \cdot \rho \cdot V}{\alpha \cdot F},$$

где F – площадь внешних поверхностей (м^2); ρ – плотность изоляции ($\text{кг}/\text{м}^3$); α – коэффициент теплообмена изоляции ($\text{Дж}/\text{м}^2 \cdot \text{К} \cdot \text{с}$); V – объем пропитанной изоляции (м^3).

Соотношение значений объема пропитанной изоляции и площади внешних поверхностей σ является показателем геометрической характеристики. Найти этот показатель возможно только при наличии геометрических размеров восстанавливаемого объекта. Определим геометрические размеры ИП основных серий электровозов переменного тока (рис. 2).

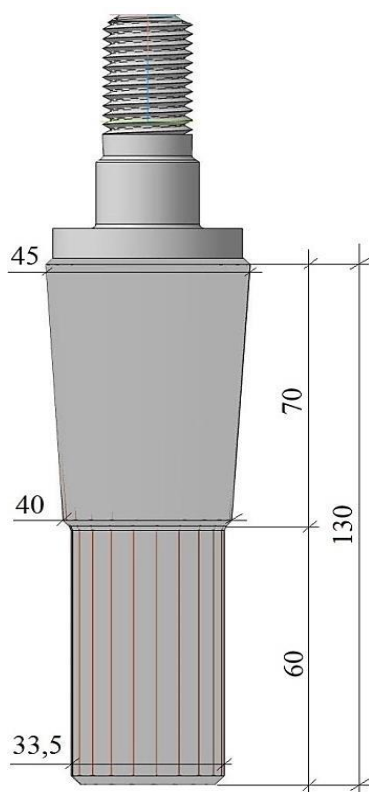


Рис. 2. Геометрические размеры изоляционного пальца электровозов переменного тока

На основании геометрической формы ИП получаем формулу

$$\sigma = \frac{V}{F} = \frac{V_{\text{кон}} + V_{\text{цил}}}{F_{\text{кон}} + F_{\text{цил}} + F_t},$$

или

$$\sigma = \frac{\frac{1}{3} \cdot \pi \cdot l \cdot (r_1^2 + r_1 \cdot r_2 + r_2^2) + \pi \cdot r^2 \cdot l}{\pi \cdot l \cdot (r_1 + r_2) + 2\pi \cdot r \cdot l + \pi \cdot r^2},$$

где $F_{\text{кон}}$, $F_{\text{цил}}$, F_t – площадь конусной, цилиндрической и торцевой части соответственно (мм^2); $V_{\text{кон}}$, $V_{\text{цил}}$ – объем конусной и цилиндрической части (мм^3); r – радиус основания цилиндра (мм); r_1 , r_2 – радиусы оснований усеченного конуса (мм); l – высота элемента (мм).

За счет того, что изоляционный палец вращается вокруг своей оси, режим сушки пропитанной изоляции будет осциллирующим (прерывистым). Исследование процесса упрочнения изоляционных элементов при помощи ИК-излучения позволяет судить о ряде преимуществ осциллирующего энергоподвода.

Стоит отметить, что относительно быстрое увеличение температуры изоляции после прохождения критической точки способствует длительному высокому перегреву, что значительно ухудшает технологические свойства изоляции восстанавливаемого объекта. При этом температурный градиент, направленный противоположно градиенту содержания растворителя, выполняет замедление перемещения растворителя из внутренних слоев к наружным, что также оказывает негативное влияние на качество выполнения процесса восстановления. Для того чтобы предотвратить перегрев электроизоляционного материала при восстановлении достаточно воспользоваться прерывистым (осциллирующим) режимом ИК-энергоподвода, т. е. сочетать нагрев объекта ИК-излучением и охлаждение воздушными потоками [13–16]. Рассмотрим и проанализируем ИК-энергоподвод в технологии восстановления изоляционных пальцев кронштейнов щеткодержателей (рис. 3).

В течение времени $\tau_{\text{наг}}$ ИП, установленные на карусели, располагаются напротив включенных ИК-излучателей, тем самым они нагреваются со значительным испарением жидкости в поверхностных слоях. При нагреве равномерно вращающегося пальца также выполняется осцилляция в связи с тем, что изменяется положение изоляционной поверхности объекта. Данное изменение положения относительно излучателя имеет характер движения точки по окружности (по синусоиде) (рис. 4), которая содержит набор нескольких интервалов τ_1 , когда точка находится под действием



излучателя, и τ_2 , когда она охлаждается. Набор этих временных интервалов составляет общий промежуток времени нагрева изоляции $\tau_{наг}$.

В течение времени $\tau_{охл}$ пальцы, не попадающие под воздействие энергии от ИК-излучателя, охлаждаются по причине испарения жидкости за счет аккумулированной теплоты. Поочередность сегментов вращающегося изоляционного пальца, который попадает в промежутки $\tau_{наг}$ и $\tau_{охл}$, происходит с повторением по времени $\tau_{осц}$. Величина средней мощности излучателя зависит от соотношения величин $\tau_{наг}$ и $\tau_{осц}$.

Отношение $\tau_{наг}$ к $\tau_{осц}$ является коэффициентом относительной продолжительности ИК-энергоподвода и обозначается индексом ε :

$$\varepsilon = \frac{\tau_{наг}}{\tau_{осц}} = \frac{\tau_{наг}}{\tau_{наг} + \tau_{охл}} = \frac{\tau_{наг}}{\Sigma(\tau_1 + \tau_2) + \tau_{охл}}$$

При изменении $\tau_{наг}$ и $\tau_{осц}$ возникает потребность в управлении сушкой изоляции. Соотношение периодов нагрева $\tau_{наг}$ и охлаждения $\tau_{охл}$ изоляции определяется коэффициентом диффузии растворителя. Согласно теории сушки, чем меньше коэффициент диффузии, тем больше должны быть паузы. Во время восстановления изоляции нужно добиваться такого соотношения $\tau_{наг}/\tau_{охл}$, при котором зависимость между содержанием растворителя и временем нагрева будет линейной [17–19].

Значение температуры изоляционных пальцев будет изменяться по отрезкам экспоненциаль-

ных кривых, пока не достигнет установившихся колебаний со сравнительно небольшими амплитудами. Вследствие охлаждения ИП при паузах наибольшая температура $t_{max осц}$ будет значительно меньше величины $t_{непр}$, значение которой достигается при непрерывном восстановлении. На протяжении всего времени осциллирующего режима сушки температура перегрева $t_{max осц}$ не должна превышать предельно допустимого значения для выбранного класса используемой изоляции.

Таким образом, температура в конце участка нагрева $\tau_{наг}$ достигнет

$$t_{max осц} = t_{непр} (1 - e^{-\tau_{наг}/T_H}) + t_{min осц} e^{-\tau_{наг}/T_H};$$

температура в конце паузы понизится до значения

$$t_{min осц} = t_{непр} e^{-\tau_{охл}/T_0}$$

Зная выражение $t_{min осц}$ после подстановки в основное уравнение получим:

$$t_{max осц} = t_{непр} (1 - e^{-\tau_{наг}/T_H}) + t_{непр} e^{-(\tau_{наг}/T_H + \tau_{охл}/T_0)}$$

Решая полученное выражение относительно $t_{непр}$, будем иметь

$$t_{max осц} = t_{непр} \frac{1 - e^{-\tau_{наг}/T_H}}{1 - e^{-(\tau_{наг}/T_H + \tau_{охл}/T_0)}}$$

В связи с тем, что при осциллирующем ИК-энергоподводе теплоотдача с поверхности изоля-

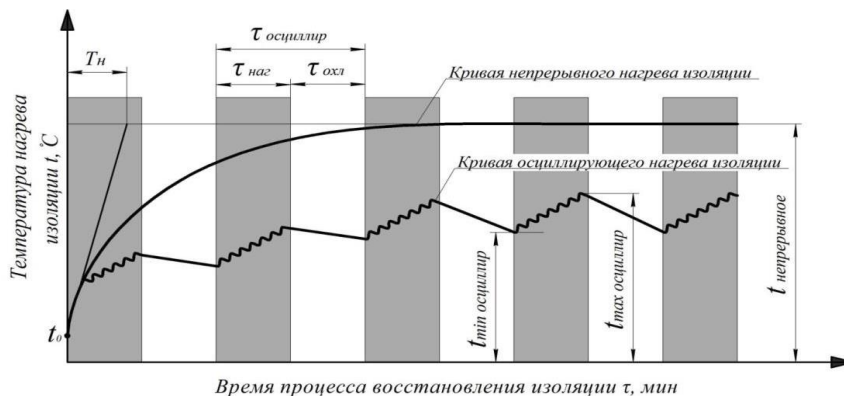


Рис. 3. Осциллирующий ИК-энергоподвод в технологии восстановления изоляционных пальцев

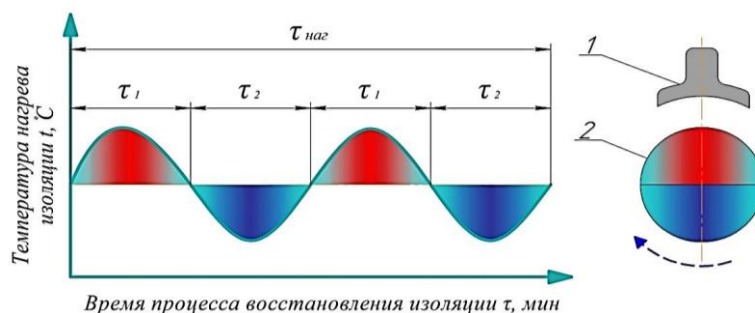


Рис. 4. Нагрев равномерно вращающегося изоляционного пальца: 1 – импульсный керамический ИК-излучатель; 2 – изоляционный палец



ционного материала во внешнюю среду при нагреве и охлаждении остается неизменной, имеем возможность принять значения $T_n = T_o$, получив тем самым итоговое уравнение

$$t_{\max \text{ осц}} = t_{\text{непр}} \frac{1 - e^{-\tau_{\text{нар}}/T_n}}{1 - e^{-\tau_{\text{осц}}/T_n}}$$

Проведенное математическое моделирование позволило получить формулу для определения эффективной скважности периода работы излучателей в технологии восстановления изоляционных пальцев кронштейнов щеткодержателей с осциллирующим режимом ИК-энергоподвода.

Заключение

Использование полученной формулы для решения задач по выявлению эффективной скважности импульса работы излучателей (внутренний

перенос массы и тепла) и выработке рекомендаций по расчету максимальной продолжительности цикла осциллирования (внешний теплоперенос) позволят разработать современные установки промышленного назначения для восстановления изоляции ИП кронштейнов щеткодержателей тяговых электродвигателей с осциллирующим режимом ИК-энергоподвода [20]. Для карусельной установки осциллирующие режимы ИК-энергоподвода обеспечиваются путем передвижения пальцев по карусели при постоянно работающих излучателях. Основным достоинством ее применения является повышение срока службы инфракрасных излучателей в эксплуатации за счет исключения пусковых режимов при их частых включениях и отключениях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шалаев А.С., Гордиенко, А.В. Возможные неисправности электрических машин // Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки : сб. ст. по материалам XXV междунар. студ. науч.-практ. конф. № 10 (24). URL: [http://sibac.info/archive/technic/10\(24\).pdf](http://sibac.info/archive/technic/10(24).pdf) (дата обращения 20.02.2018).
2. Новый метод сушки увлажненной изоляции обмоток ТД / А.М. Худоногов и др. // Развитие транспортной инфраструктуры – основа роста экономики Забайкальского края : материалы Междунар. науч.-практ. конф. Чита, 2008. С. 222–230.
3. Валишин А.А., Карташов Э.М. Статистическое описание теплового движения в полимерах. Пластические массы. 2006. № 7. С. 36–39.
4. Лобыцин И.О., Дульский Е.Ю., Васильев А.А. Повышение надёжности изоляционных пальцев кронштейнов щеткодержателей электрических машин тягового подвижного состава // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2017. № 4 (56). С. 218–224.
5. Пат. № 2324278 Рос. Федерации. Способ сушки изоляции электрических машин / А.М. Худоногов, Д.В. Коноваленко, Р.Ю. Упырь. № 2006143925/09 ; заявл. 11.12.2006 ; опубл. 10.05.2008, Бюл. № 13
6. Винер Н., Пэли Р. Преобразование Фурье в комплексной области. М., Наука, 1964.
7. Васильев А.А. Худоногов И.А., Лыткина Е.М. Рациональные режимы осциллирующего ИК - энергоподвода в технологии упрочнения изоляции лобовых частей обмоток электрических машин // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы II Межвуз. науч.- практ. конф. Иркутск, 2011. С. 258–263.
8. Лыткина Е.М. Повышение эффективности капсулирования изоляции лобовых частей обмоток тяговых двигателей электровозов инфракрасным излучением : дис. ... канд. техн. наук. Иркутск, 2011. 205 с.
9. Худоногов А.М. Лыткина Е.М., Дульский Е.Ю. Критерий обоснованности выбора пропиточного материала в технологии ремонта тяговых электрических машин подвижного состава // Повышение тягово-энергетической эффективности и надежности электроподвижного состава : межвуз. темат. сб. науч. тр. Омск, 2013. С. 38–43
10. Лыков А.В. Тепло и массообмен в процессах сушки. М. : Госэнергоиздат, 1956. 464 с.
11. Ресурсосберегающие принципы технологии сушки увлажнённой изоляции электрооборудования ЭПС / В.В. Макаров и др. : сб. науч. тр. Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2001. Т.1. С. 32–37.
12. Худоногов А.М. Тепловой баланс и пути повышения тепловой экономичности радиационной сушилки // Улучшение эксплуатации и ремонта сельскохозяйственной техники. Иркутск, 1973. С. 84–88.
13. Принципы управления энергоподводом в процессах удаления влаги из изоляции обмоток тяговых электрических машин / А.М. Худоногов и др. // Энергосбережение: технологии, приборы, оборудование : сб. науч. трудов / под ред. А.В. Крюкова. Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2009. С. 125–129.
14. Смирнов В.П., Худоногов А.М. Широотно-прерывный метод сушки увлажненной изоляции тяговых электродвигателей // Науч. проблемы трансп. Сибири и Дальнего Востока. 2003. №3. С. 185–192.
15. Дульский Е.Ю. Совершенствование технологии восстановления пальцев щеткодержателей электрических машин тягового подвижного состава // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы шестой междунар. науч.-практ. конф. Иркутск : 2016. С. 510–513.
16. Пат. № 2494517 Рос. Федерации. Трехциклового амплитудно-широотно-прерывный способ сушки изоляции электрических машин / В.В. Сидоров и др. № 2011150204/07 ; заявл. 09.12.2011 ; 27.09.2013, Бюл. № 27.
17. Дульский Е.Ю., Худоногов А.М., Лыткина Е.М. Влияние химических свойств полимеров и режимов ИК-энергоподвода на прочность и пластичность изоляции в локальных технологиях продления ресурса электрических машин тягового подвижного состава // Изв. Транссиба. 2015. № 1 (21). С. 6–11.
18. Разработка и исследование установки для сушки изоляционных пальцев кронштейнов щеткодержателей/ И.О. Лобыцин и др. // Наука и молодежь : сб. тр. Четвертой Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных. Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2018. С. 123–127.



19. Мельниченко О.В. Математическое моделирование выпрямительно-инверторного преобразователя электровоза в аварийных режимах с типовым и предлагаемым способами управления // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2013. 4 (40). С 229–233.
20. Дульский Е.Ю., Каргапольцев С.К. Капсулирование электроизоляции из полимерных материалов тяговых электродвигателей при воздействии инфракрасного излучения // Безопасность и живучесть технических систем : материалы и доклады : материалы V Всерос. конф. Красноярск : Изд-во Сиб. Федер. ун-та, 2015. Т.1. С. 175–180.

REFERENCES

1. Shalaev A.S., Gordienko A.V. Vozmozhnye neispravnosti elektricheskikh mashin [Possible malfunctions of electric cars]. *Nauchnoe soobshchestvo studentov XXI stoletiya. Tekhnicheskie nauki: sb. st. po mat. XXV mezhdunar. stud. nauch.-prakt. konf. [Scientific community of students of the XXI century. Engineering science: Coll. of papers on the mater. of the XXV internat. student scientific-practical conf.]*. No. 10(24).
2. Khudonogov A.M., Konovalenko D.V., Sidorov V.V., Lytkina E.M. Novyi metod sushki uvlazhnennoi izolyatsii obmotok TD [New method of drying wet insulation of traction motor windings]. *Razvitiye transportnoi infrastruktury – osnova rosta ekonomiki Zabaikal'skogo kraia. Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii ZabIZhT [Development of transport infrastructure is the basis of economic growth in Zabaikalsky region. Proceedings of the international scientific-practical conference]*, 2008, pp. 222 – 230.
3. Valishin A.A., Kartashov E.M. Statisticheskoe opisanie teplovogo dvizheniya v polimerakh [Statistical description of thermal motion in polymers]. *Plasticheskie massy [Plastics]*, 2006. No. 7, pp. 36-39.
4. Lobytsin I.O., Dul'skii E.Yu., Vasil'ev A.A. Povyshenie nadezhnosti izolyatsionnykh pal'tsev kronshteynov shchetkoderzhatelei elektricheskikh mashin tyagovogo podvizhnogo sostava [Improving the reliability of the insulating fingers of the brackets of the brush holders of electric machines of the traction rolling stock]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie [Modern technologies. System analysis. Modeling]*, 2017. No.4 (56), pp. 218 – 224 p.
5. Khudonogov A.M., Konovalenko D.V., Upyr' R.Yu. *Sposob sushki izolyatsii elektricheskikh mashin [Method of drying the insulation of electrical machines]*. Patent RF No. 2324278.
6. Viner N., Peli R. *Preobrazovanie Fur'e v kompleksnoi oblasti [Transformation in the Complex Region]*. Moscow: Nauka Publ., 1964.
7. Vasil'ev A. A., Alekseev D.V., Khudonogov I. A., Lytkina E. M. Ratsional'nye rezhimy ostsilliruyushchego IK - energopodvoda v tekhnologii uprochneniya izolyatsii lobovykh chastei obmotok elektricheskikh mashin [Rational modes of oscillating IR - power supply in the technology of hardening insulation of the frontal parts of the windings of electrical machines]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona: materialy II Mezhvuzovskoi nauch.- prakt. konf. FGBOU VPO «IrGUPS», 16–18 maya 2011 [Transport Infrastructure of the Siberian Region: Materials of the II Intercollegiate scientific and practical conference. FSBEI HPE "IrGUPS", May 16–18, 2011]*. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2011.
8. Lytkina E.M. Povyshenie effektivnosti kapsulirovaniya izolyatsii lobovykh chastei obmotok tyagovykh dvigatelei elektrovozov infrakrasnym izlucheniem: dissertatsiya na soiskanie uchenoi stepeni kand. tekhn. nauk [Improving the efficiency of encapsulation of the insulation of the frontal parts of the windings of traction motors of electric locomotives by infrared radiation: Ph.D. (Engineering) dissertation]. Irkutsk, 2011. 205 p.
9. Khudonogov A.M., Khudonogov A.M., Lytkina E.M., Dul'skii E.Yu. Kriterii obosnovannosti vybora propitochnogo materiala v tekhnologii remonta tyagovykh elektricheskikh mashin podvizhnogo sostava [The criterion of the validity of the choice of impregnating material in the technology of repair of traction electric vehicles of rolling stock]. *Povyshenie tyagovo-energeticheskoi effektivnosti i nadezhnosti elektropodvizhnogo sostava: Mezhvuz. temat. sb. nauch. tr. [Increase of traction and energy efficiency and reliability of electric rolling stock: Interuniv. subject. coll. of scientific papers.]*. Omsk: Omsk state transport un-ty Publ., 2013, pp. 38 – 43.
10. Lykov A.V. *Teplo i massoobmen v protsessakh sushki [Heat and mass transfer in drying processes]*. Moscow: Gosenergoizdat Publ., 1956. 464 p.
11. Makarov V.V., Smirnov V.P., Khudonogov A.M., Efremov E.V. Resursosbergayushchie printsipy tekhnologii sushki uvlazhnennoi izolyatsii elektrooborudovaniya EPS [Resource-saving principles of drying technology of wet insulation of electrical equipment of EPS]. *Sb. nauch. Tr. [Coll. of scientific papers]*. Khabarovsk: DVGUPS Publ., 2001. Vol.1, pp. 32-37.
12. Khudonogov A.M. Teplovoi balans i puti povysheniya teplovoi ekonomichnosti radiatsionnoi sushilki [Heat balance and ways to increase the thermal efficiency of a radiation dryer]. *Uluchshenie ekspluatatsii i remonta sel'skokhozyaistvennoi tekhniki [Improving the operation and repair of agricultural machinery]*, Irkutsk, 1973, pp. 84-88.
13. Khudonogov A.M., Smirnov V.P., Konovalenko D.V., Gamayunov I.S. et al. Il'ichev Printsipy upravleniya energopodvodom v protsessakh udaleniya vlagi iz izolyatsii obmotok tyagovykh elektricheskikh mashin [Principles of energy management in the process of removing moisture from the insulation of the windings of traction electrical machines]. *Energoberezhenie: tekhnologii, pribory, oborudovanie: Sb. nauchn. trudov [Energy Saving: Technologies, Instruments, Equipment: Coll. of scientific papers]*. In Kryukov A.V. (ed.). Irkutsk: IrGUPS Publ., 2009, pp. 125 – 129.
14. Smirnov V.P., Khudonogov A.M. Shirotno-preryvnyi metod sushki uvlazhnennoi izolyatsii tyagovykh elektrodvigatelei [Lateral-intermittent method of drying wet insulation of traction motors]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka [Scientific problems of transport in Siberia and Far East]*, 2003. No.3, pp. 185-192.
15. Dul'skii E.Yu. Sovershenstvovanie tekhnologii vosstanovleniya pal'tsev shchetkoderzhatelei elektricheskikh mashin tyagovogo podvizhnogo sostava [Improving the technology of restoring the fingers of the brush holders of electric machines for traction rolling stock]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona: Materialy shestoi mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii 2016 g. Irkutsk: in 2 vols. [Transport infrastructure of the Siberian region: Proceedings of the sixth international scientific-practical conference, 2016]*. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2016. 760 p, pp. 510– 513.
16. Sidorov V.V., Lytkina E.M., Konovalenko D.V., Khudonogov A.M., Garev N.N., Dul'skiy E.Yu., Ivanov P.Yu. *Trekhtsklovoye amplitudno-shirotno-preryvnyi sposob sushki izolyatsii elektricheskikh mashin [Three-cycle amplitude-width-intermittent method of drying the insulation of electrical machines]*. Patent RF No. 2494517.



17. Dul'sky E.Yu., Khudonogov A.M., Lytkina E.M. Vliyanie khimicheskikh svoystv polimerov i rezhimov IK-energopodvoda na prochnost' i plastichnost' izolyatsii v lokal'nykh tekhnologiyakh prodleniya resursa elektricheskikh mashin tyagovogo podvijnogo sostava [Influence of the chemical properties of polymers and IR power supply modes on the strength and plasticity of insulation in local technologies of extending the service life of electric machines of traction rolling stock]. *Izvestiya Transsiba [News of Transsib]*. Omsk : Omsk State Transport Un-ty Publ., 2015. No. 1 (21), pp. 6-11.

18. Lobyt'sin I.O., Khudonogov A.M., Dul'sky E.Yu., Tyumentsev A.V. Razrabotka i issledovanie ustanovki dlya sushki izolyatsionnykh pal'tsev kronshteynov shchetkoderzhatelei [Development and research of the installation for drying the insulating fingers of the brush holder brackets]. *Nauka i molodezh': sbornik trudov Chetvertoi Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh [Science and Youth: Collected papers of the Fourth All-Russian Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists]*. Irkutsk : IrGUPS Publ., 2018, pp. 123 - 127.

19. Mel'nichenko O.V. Matematicheskoe modelirovanie vypryamitel'no-invertornogo preobrazovatelya elektrovoza v avariinnykh rezhimakh s tipovym i predlagaemym sposobami upravleniya [Mathematical modeling of a rectifier-inverter converter of an electric locomotive in emergency conditions with standard and proposed control methods]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie [Modern technologies. System analysis. Modeling]*, 4 (40), 2013, pp. 229–233.

20. Dul'sky E.Yu., Kargapol'tsev S.K. Kapsulirovanie elektroizolyatsii iz polimernykh materialov tyagovykh elektrodvigatelye pri vozdeystvii infrakrasnogo izlucheniya [Encapsulation of electrical insulation from polymer materials of traction motors when exposed to infrared radiation]. *Bezopasnost' i zhivuchest' tekhnicheskikh sistem: materialy i doklady V Vserossiiskoi konferentsii (Krasnoyarsk, 12-16 oktyabrya 2015 goda) [Safety and survivability of technical systems: materials and reports of the V All-Russian Conference (Krasnoyarsk, October 12-16, 2015)]*: in 3 vols; In Moskvichev V.V. (sc. ed.). Krasnoyarsk: Sib. Feder. University, 2015. Vol.1, 263 p., pp. 175-180.

Информация об авторах

Authors

Лобыцин Игорь Олегович – аспирант, кафедра «Электроподвижной состав», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: lobycin@mail.ru

Igor' Olegovich Lobyt'sin – Ph.D. student of the Subdepartment of Electric Stock, Irkutsk State Transport University. e-mail: lobycin@mail.ru

Дёмина Оксана Олеговна – магистрант, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: dokc1988@mail.ru

Oksana Olegovna Demina – Master's Degree student, Irkutsk State Transport University. e-mail: dokc1988@mail.ru

Для цитирования

For citation

Лобыцин И. О. Математическое моделирование осциллирующего ик-энергopодвода в технологии восстановления изоляционных пальцев тяговых электродвигателей локомотивов / И. О. Лобыцин, О. О. Дёмина // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – Т. 61, № 1. – С. 118–125. – DOI: 10.26731/1813-9108.2019.1(61).118–125

Lobyt'sin I. O., Demina O. O. Matematicheskoe modelirovanie ostsilliruyushchego ik-energopodvoda v tekhnologii vostanovleniya izolyatsionnykh pal'tsev tyagovykh elektrodvigatelye lokomotivov [Mathematical modeling of the oscillating mode of the IR-energy supply in the technology of restoration of insulating fingers of electric motors of locomotives]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovaniye [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]*, 2019, Vol. 61, No. 1, pp. 118–125. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.1(61).118–125

УДК 658.516

DOI: 10.26731/1813-9108.2019.1(61).125–131

В. Ц. Ванчиков¹, А. В. Данеев², А. В. Данеев³

¹ Восточно-Сибирский филиал Российского государственного университета правосудия, г. Иркутск, Российская Федерация

² Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

³ Бурятский государственный университет, г. Улан-Удэ, Российская Федерация

Дата поступления: 8 октября 2018 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМНЫХ СВЯЗЕЙ В СТРУКТУРЕ ЖИДКОСТЕЙ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ВИХРЕЙ В ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ

Аннотация. В статье рассматривается явление прилипания молекул гидродинамического потока к внутренней поверхности капиллярных трубок с позиции теории вихрей. При этом показано, что дискретное строение микроструктуры твердого тела обнаруживается в виде численной величины, равной 6,3. Если представить отмеченную численную величину в виде выражения $(1/6,3) \approx 0,16$, то оказывается, что оно связано с результатами сдвиговой деформации идеального кристалла, перколяционных и гидравлических явлений. Известно, что течения реальных жидкостей являются вихревыми. Чрезвычайно сложные проблемы, возникающие при исследовании турбулентного движения жидкости, не позволяли до сих пор концептуально оформить и развить теорию турбулентности. Турбулентные течения сопровождаются различными сингулярностями, что приводит к необходимости существенного изменения континуальной модели. Большое распространение в этих подходах получили уравнения профессора А.Н. Панченкова. Решение задач проектирования и испытания моделей наномашин (нанодвигате-