

Результаты испытаний резонансной однопроводной системы передачи электроэнергии для индукционного нагрева рельсов стрелочного перевода

Д. В. ЕРМОЛЕНКО¹, Л. Ю. ЮФЕРЕВ², О. А. РОЩИН²

¹ Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»), Москва, 129626, Россия

² Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ), Москва, 109428, Россия

Аннотация. Представлены результаты испытаний резонансной однопроводной системы передачи электроэнергии для индукционного нагрева рельсов стрелочного перевода при организации движения поездов в сложных зимних климатических условиях.

В эксперименте использовалась резонансная однопроводная система передачи электрической энергии для питания индукционных нагревателей рельсов стрелочного перевода. Проведены замеры электрических и тепловых параметров индукционной нагревательной системы. Рассмотрены ее преимущества перед системой нагрева рельсов трубчатыми электронагревательными элементами. Разработанное оборудование действует по принципу «прямого нагрева», что позволяет увеличить скорость нагрева или уменьшить потребление электроэнергии при той же скорости нагрева электронагревательными элементами. Имеется возможность применения одного силового преобразователя для нескольких стрелочных переводов, а также использования предлагаемой системы в северных регионах — за счет большей температуры нагрева в сочетании с относительно малым потреблением электроэнергии.

Ключевые слова: резонансная однопроводная система; преобразователь частоты; резонансный контур; индукционный нагрев рельсов и стрелок; активная энергия; реактивная энергия; токи Фуко; нагрев при помощи ТЭН

Введение. Революционные изменения в электро-технике, обусловленные появлением современной силовой электроники, цифровой и аналоговой систем управления, позволили создать резонансную однопроводную систему передачи электрической энергии на повышенной частоте. Резонансная система передачи дает возможность развития инновационной технологии нагрева индукционным способом за счет возбуждения электрических токов повышенной частоты переменным электромагнитным полем [1, 2, 3].

В ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства» (ФГБНУ ВИЭСХ), а с 2016 г. в Федеральном научном агроинженерном центре ВИМ (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ) ведутся разработки резонансной системы передачи электрической энергии по однопровод-

ной кабельной или воздушной линии на повышенной частоте [1, 2, 3, 4]. Начало разработок было положено в 1992 г. С 2012 г. выполняется совместное исследование резонансных систем учеными ВИЭСХ и ВНИИЖТ.

Во время выпадения осадков в виде снега, а также в периоды перепадов температуры велика вероятность образования наледей, препятствующих свободному перемещению стрелок. Для исключения этого снег убирают вручную, обдувают сжатым воздухом или применяют трубчатые электронагревательные элементы (ТЭН) для плавления снега и льда. При этом известно, что КПД индукционного нагрева выше по сравнению с нагревом при помощи ТЭН [5, 6, 7].

Целью проекта была разработка и создание оборудования для индукционного нагрева рельсов и стрелок на основе резонансной системы передачи электроэнергии по одному проводу на повышенной частоте и, как следствие, увеличение КПД системы удаления снега на стрелочных переводах (СП).

Задачей проекта являлось улучшение конструкции устройства для нагрева рельсов и стрелок до заданной температуры в автоматическом режиме путем использования устройства индукционного нагрева с удаленным генератором повышенной частоты, позволяющего уменьшить потребление электроэнергии.

Преимущества и возможности предлагаемого технического решения:

- низкий уровень электромагнитного излучения;
- большое расстояние между генератором и индукторами;
- уменьшение расходов электроэнергии;
- нагрев только рельса, а не нагревательного элемента;
- увеличение скорости нагрева;
- автоматическое включение–выключение.

■ E-mail: Ermolenko.Dmitry@vniizht.ru (Д. В. Ермоленко)

Схема устройства для индукционного нагрева рельсов и стрелок, в котором индукторы включены последовательно к однопроводной линии электропередачи [8], представлена на рис. 1.

Схема работает следующим образом: частота напряжения питающей электросети повышается генератором частоты 1 до уровня 1–100 кГц. Затем напряжение подается на резонансный повышающий трансформатор 3, через емкость 2, где повышается. С выхода резонансного повышающего трансформатора напряжение подается в однопроводную линию электропередачи 4, к которой последовательно подключены индукторы 6 с суммарным рабочим напряжением, равным выходному напряжению повышающего трансформатора 3. Индукторы устанавливаются на нагреваемом рельсе 9 с зазором или без него. Автоматическое управление осуществляется внешним датчиком состояния окружающей среды 5, который подает сигнал включения преобразователя частоты.

Принципиальная схема устройства для индукционного нагрева рельсов и стрелок, в котором индукторы включены параллельно к однопроводной линии электропередачи через понижающий трансформатор, представлена на рис. 2.

Схема работает следующим образом: частота напряжения питающей электросети повышается генератором частоты 1 до уровня 1–100 кГц. Затем подается на резонансный повышающий трансформатор 3, через емкость 2, где повышается. С выхода резонансного повышающего трансформатора напряжение подается в однопроводную линию электропередачи 4, к которой подключается понижающий трансформатор 5, к его выходной обмотке параллельно подключены индукторы 6, при этом выходное напряжение понижающего трансформатора 5 соответствует рабочему напряжению индукторов, которые устанавливаются на нагреваемом рельсе 9 с зазором или без него. Автоматическое управление осуществляется внешним датчиком состояния окружающей среды 10, который подает сигнал включения преобразователя частоты.

Индукторы выполнены на основе ферритовых или металлических сердечников с изолированной обмоткой.

Экономия электроэнергии осуществляется за счет использования индукционного нагрева и автоматического управления, которое включает нагрев только при срабатывании датчиков наличия снега или льда на рельсах. Мощность, затрачиваемая на нагрев, может составлять от 100 до 500 Вт/м, при этом рельс нагревается на 30–100 °С.

Лабораторные испытания (рис. 3) показали возможность и целесообразность применения нагрева индукционным способом на основе резонансной системы передачи электроэнергии на повышенной ча-

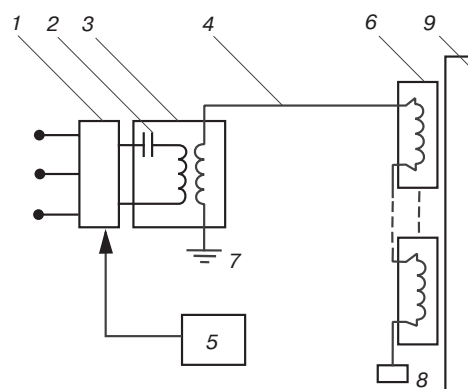


Рис. 1. Резонансная система индукционного нагрева с последовательным включением индукторов:
1 — генератор повышенной частоты; 2 — емкость;
3 — резонансный повышающий трансформатор;
4 — однопроводная линия электропередачи; 5 — внешний датчик состояния окружающей среды; 6 — индукторы; 7, 8 — заземление;
9 — нагреваемый рельс

Fig. 1. Resonant induction heating system with serial connected inductors:
1 — high frequency generator; 2 — capacity;
3 — resonant step-up transformer; 4 — single-wire power line;
5 — external environmental sensor; 6 — inductors;
7, 8 — earthing; 9 — heated rail

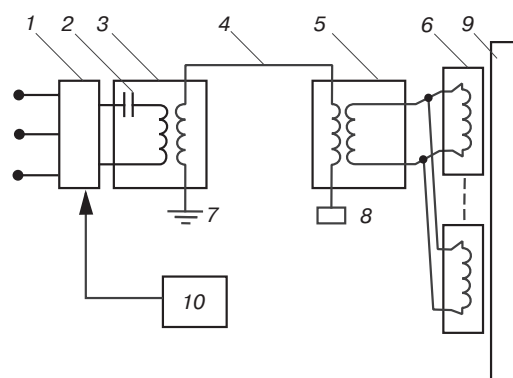


Рис. 2. Резонансная система индукционного нагрева с параллельным включением индукторов:
1 — генератор повышенной частоты; 2 — емкость;
3 — резонансный повышающий трансформатор;
4 — однопроводная линия электропередачи;
5 — понижающий трансформатор;
6 — индукторы; 7, 8 — заземление; 9 — нагреваемый рельс;
10 — внешний датчик состояния окружающей среды

Fig. 2. Resonant induction heating system with parallel connected inductors:
1 — high frequency generator; 2 — capacity;
3 — resonant step-up transformer; 4 — single-wire power line;
5 — step-down transformer;
6 — inductors; 7, 8 — earthing; 9 — heated rail; 10 — external environmental sensor

стоте. Индукционный нагрев осуществляется за счет наведения вихревых электрических токов переменным электромагнитным полем. При индукционном нагреве нагревается только токопроводящее тело, а не нагревательный элемент. В поверхностном слое, называемом глубиной проникновения, выделяется 86%

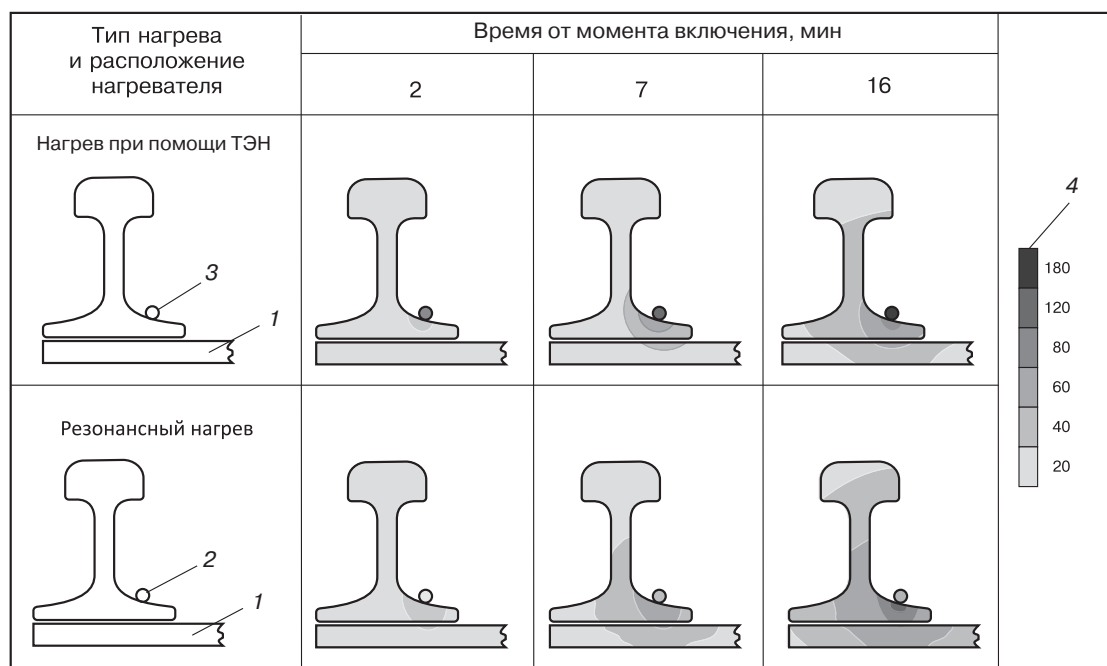


Рис. 3. Зоны теплового распределения при системах нагрева:
 1 – подошва рельса; 2 – индуктор; 3 – нагреватель; 4 – шкала температуры, °С
 Fig. 3. Zones of thermal distribution with heating systems:
 1 – rail foot; 2 – inductor; 3 – heater; 4 – temperature scale, °С

всей мощности, что позволяет экономить электроэнергию. При резонансе используется активная и реактивная энергия.

Основные технические характеристики инновационной системы индукционного нагрева рельсов стрелочного перевода на основе резонансной системы передачи электроэнергии по одному проводу на повышенной частоте:

- напряжение и частота питания передающего преобразователя — 380 В, 50 Гц;
- выходная мощность передающего преобразователя — 6–20 кВт;
- напряжение в линии электропередачи — менее 1 кВ;
- габаритные размеры передающего преобразователя — 500×400×350 мм;

Таблица 1

Результаты испытаний по первой схеме (рис. 1) линия — индукторы

Table 1

Test results for the first scheme (fig. 1) line — inductors

Напряжение на выходе генератора, В	Ток на выходе генератора, А	Частота, кГц	Напряжение в линии электропередачи, В	Ток в линии электропередачи, А	Напряжение на входе индуктора, В	Ток на входе индуктора, А	Выходная мощность на индукторе, Вт
300	4,0	9,0	400	3,0	100	3,0	300

Таблица 2

Результаты испытаний по второй схеме (рис. 2) линия — понижающий трансформатор — индукторы

Table 2

Test results for the second scheme (fig. 2) line — step-down transformer — inductors

Напряжение на выходе генератора, В	Ток на выходе генератора, А	Частота, кГц	Напряжение в линии электропередачи, В	Ток в линии электропередачи, А	Напряжение на входе индуктора, В	Ток на входе индуктора, А	Выходная мощность на индукторе, Вт
300	4,0	9,0	950	1,3	100	3,0	300

- длина линии электропередачи от передающего преобразователя до места нагрева — до 1500 м;
- удельная мощность нагрева рельса — 500 Вт/м;
- повышение температуры рельса — до 50 °С.

В ФГБНУ ВИЭСХ были проведены испытания опытного оборудования резонансной однопроводной системы передачи электроэнергии для индукционного нагрева рельсов стрелочного перевода при организации движения поездов в сложных зимних климатических условиях. Целью испытаний было определение основных технических характеристик оборудования однопроводной системы передачи электроэнергии. Результаты испытаний по первой схеме линия — индукторы (рис. 1) представлены в табл. 1.

Результаты испытаний по второй схеме линия — понижающий трансформатор — индукторы (рис. 2) представлены в табл. 2.

Главный недостаток системы нагрева при помощи ТЭН заключается в том, что это нагреватель косвенного нагрева: спираль — корпус — среда (рельс). При его работе вероятно выпаривание смазки из зоны острияков СП. При контактно-способе передачи тепла возможны размыкания, низкая эффективность энергозатрат, локальный перегрев ТЭН, приводящий к их перегоранию. Высокая чувствительность к механическому воздействию, например при ручной и механизированной очистке пути, и к вибрациям (от прохождения подвижного состава). Для ТЭН характерны низкая надежность и относительно малый срок службы. В случае отказа электрозащиты устройства опасны для людей и СЦБ, так как рабочее напряжение — 220 В. Высокое энергопотребление и плохое испарение талого снега делает неэффективным использование нагрева при помощи ТЭН в северных регионах и для высокоскоростного движения.

Рассмотрим преимущества индукционного нагрева в резонансном режиме, при котором принципиально меняется философия нагрева элементов СП. Обогрев элементов СП обеспечивается бесконтактным способом, при этом снижается расход электроэнергии за счет прямого нагрева, автоматической проверки отсутствия наледи и периодического отключения обогрева. Снижается энергоемкость и уменьшаются габариты электрооборудования за счет передачи электрической энергии на повышенной частоте в резонансном режиме. Сокращаются расходы, связанные с текущим обслуживанием, например, не требуются громоздкие шкафы с силовым оборудованием в путевом развитии станции. Индукторы обладают высокой надежностью и продолжительным сроком службы. Появляется возможность применения одного силового преобразователя для несколь-

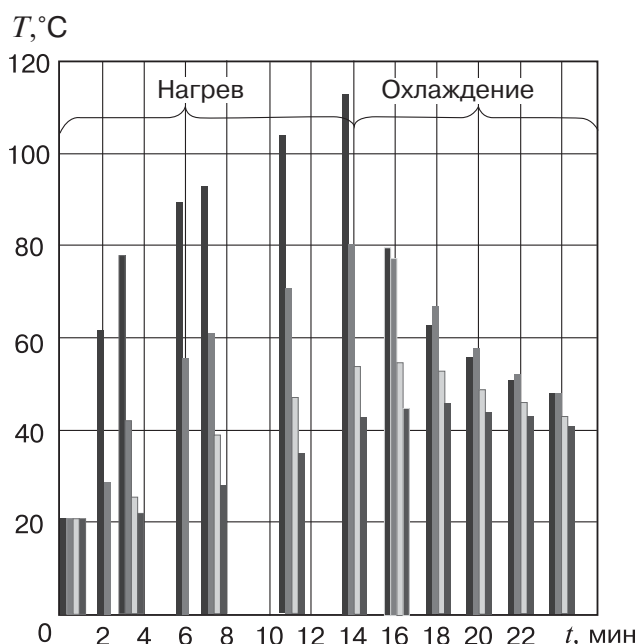


Рис. 4. Сравнение скорости нагрева рельса резонансной индукционной системой и ТЭН с одинаковой мощностью 500 Вт/м (1–14-я мин) и скорости охлаждения (14–24-я мин). Расположение датчиков на рельсе, соответствующие им показания на гистограмме:

- сбоку напротив ТЭН; ■ сбоку напротив индуктора;
- снизу под ТЭН; ■ снизу под индуктором

Fig. 4. Comparison of the heating rate of the rail by a resonant induction system and TЭН with the same power of 500 W/m (1–14 minutes) and the cooling rate (14–24 minutes). Location of the sensors on the rail, corresponding readings on the histogram:

- side opposite TЭН; ■ side opposite the inductor;
- below the TЭН; ■ below the inductor

ких стрелочных переводов, повышается уровень электробезопасности. Система индукционного нагрева подходит для использования на линиях с высокоскоростным движением за счет быстрого нагрева узлов СП до необходимой температуры, а также для применения в северных регионах благодаря более высокой температуре нагрева узлов СП в сочетании с относительно малым потреблением электроэнергии.

Сравнение скорости нагрева рельса резонансной индукционной системой и ТЭН одинаковой мощностью 500 Вт/м и скорости охлаждения представлено на рис. 4.

Данные, полученные в ходе испытаний (рис. 5), показали, что при нагреве с помощью ТЭН температура испытываемого рельса достигла 80 °С снизу под ТЭН (14-я мин) и 46 °С сбоку напротив ТЭН (18-я мин). При индукционном нагреве температура снизу под индуктором — 114 °С и 55 °С — сбоку напротив индуктора (16-я мин).



Рис. 5. Вид обогреваемого стрелочного перевода
Fig. 5. Type of heated switch

Заключение. Разработанное оборудование действует по принципу «прямого нагрева», что позволяет увеличить скорость нагрева или уменьшить потребление электроэнергии при той же скорости нагрева с помощью ТЭН. Имеется возможность применения одного силового преобразователя на несколько стрелочных переводов. Благодаря большей температуре нагрева в сочетании с относительно малым потреблением электроэнергии подходит для использования в северных регионах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ермоленко Д. В., Юферев Л. Ю., Рошин О. А. Результаты испытаний резонансной однопроводной системы передачи электроэнергии на объекты инфраструктуры ОАО «РЖД» // Вестник ВНИИЖТ. 2018. Т. 77. № 5. С. 295–300. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-5-295-300>.
2. Юферев Л. Ю., Рошин О. А., Александров Д. А. Основные проблемы и их устранение при проектировании РОС // Инновации в сельском хозяйстве. 2013. № 1 (3). С. 18–24.

3. Юферев Л. Ю., Стребков Д. С., Рошин О. А. Экспериментальные модели резонансных систем электрической энергии. М.: ВИЭСХ, 2010. 180 с.

4. Электрификация транспорта на переменном токе промышленной частоты повышенного напряжения / сост. под руководством акад. М. П. Костенко. М.: АН СССР, 1957. 35 с. (Вопросы советской науки).

5. Кочубей В. Ф., Евдокимов И. А. Электрообогрев стрелочных переводов, защита от снега и льда [Электронный ресурс] // Путь и путевое хозяйство: сайт для студентов и работников путевого хозяйства. URL: <https://rzd-puteetz.ru/elektroobogrev-strelochnyh-privodov/> (дата обращения: 31.10.2018 г.).

6. Устройство для очистки стрелочного перевода от снега и льда путем электрообогрева «СЭИТ-04М»: пат. на полезную модель № 141261 ФИПС (Роспатент): МПК E01B/ А. И. Лучкив [и др.]. Оpubл. 27.05.2014. Бюл. № 15.

7. Устройство для очистки стрелочного перевода от снега и льда путем электрообогрева: пат. № 2415988. ФИПС (Роспатент): МПК E01B7/24/ Ю. М. Иньков [и др.]. Оpubл. 10.04.2011. Бюл. № 10.

8. Устройство для индукционного нагрева рельсов и стрелок (варианты): пат. на полезную модель № 135655. ФИПС (Роспатент): МПК E01B31/18 / Д. В. Ермоленко [и др.]. Оpubл. 20.12.2013. Бюл. № 35.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

ЕРМОЛЕНКО Дмитрий Владимирович,
д-р техн. наук, доцент, заведующий аспирантурой,
АО «ВНИИЖТ»

ЮФЕРЕВ Леонид Юрьевич,
д-р техн. наук, доцент, главный научный сотрудник,
ФГБНУ ФНАЦ ВИМ

РОШИН Олег Алексеевич,
канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник,
ФГБНУ ФНАЦ ВИМ

Статья поступила в редакцию 09.11.2018 г., принята к публикации 21.01.2019 г.

Test results of the resonant single-wire power transmission system for induction heating of the switch rail

D. V. ERMOLENKO¹, L. Yu. YUFEREV², O. A. ROSHCIN²

¹ Joint Stock Company "Railway Research Institute" (JSC "VNIIZhT"), Moscow, 129626, Russia

² Federal State Budgetary Institution "Federal Scientific Agro-Engineering Center VIM", (FGBNU FSAEC VIM), Moscow, 109428, Russia

Abstract. The article provides results of tests of a resonant single-wire power transmission system for induction heating of a switch rail in the organization of train traffic in difficult winter climatic conditions.

Laboratory tests have shown the possibility and feasibility of applying heating by an induction method based on a resonant system for transmitting electricity at an increased frequency. Induction heating occurs in the metal due to the excitation of electric currents by an alternating electromagnetic field. With induction heating, only the conductive body is heated, and not the heating element. In the surface layer, called the penetration depth, 86 % of the total power is released, which saves energy. At resonance, active and reactive energy is used.

In the experiment a resonant single-wire system for transmitting electrical energy was used to power the induction heaters of the switch rail. Electrical and thermal parameters of the induction heating system were measured. Its advantages over the rail heating system with tubular electric heating elements (TEH) are considered.

Developed equipment operates according to the principle of "direct heating", which allows to increase the heating rate or reduce electricity consumption at the same heating rate as compared to TEH. It is possible to use one power converter for several switches. Due to its higher heating temperature combined with relatively low power consumption, it is suitable for use in the northern regions.

Developed equipment is connected to AC network with a voltage of 380 V and 50 Hz, operating frequency range is 6–10 kHz, power

consumption for heating a single object is 6–20 kW, and the voltage on the transmission line is less than 1 kV.

Keywords: resonant single-wire system; frequency converter; resonant circuit; induction heating; active energy; reactive energy; Foucault's currents; heating by TEH heaters

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-1-48-53>

REFERENCES

1. Ermolenko D. V., Yuferev L. Yu., Roshchin O. A. *Rezultaty ispytaniy rezonansnoy odnoprovodnoy sistemy peredachi elektroenergii na ob'ekty infrastruktury OAO "RZD"* [Test results of resonant single wire system transmitting power to the infrastructure objects of the JSC "RZD"]. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik of the Railway Research Institute], 2018, Vol. 77, no. 5, pp. 295–300. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-5-295-300>.

2. Yuferev L. Yu., Roshchin O. A., Aleksandrov D. A. *Osnovnye problemy i ikh ustraneniye pri proektirovaniy ROS* [The main problems and their elimination in the design of ROS]. *Innovatsii v sel'skom khozyaystve*, 2013, no. 1 (3), pp. 18–24.

3. Yuferev L. Yu., Strebkov D. S., Roshchin O. A. *Ekspериментал'nye modeli rezonansnykh sistem elektricheskoy energii* [Experimental models of resonant systems of electrical energy]. Moscow, VIESKh Publ., 2010, 180 p.

4. Kostenko M. P. *Elektrifikatsiya transporta na peremennom toke promyshlennoy chastoty povyshennogo napryazheniya* [Electrification of transport on alternating current of industrial frequency overvoltage]. Moscow, AN SSSR Publishing house, 1957, 35 p.

■ E-mail: Ermolenko.Dmitry@vniizht.ru (D. V. Ermolenko)

5. Kochubey V. F., Evdokimov I. A. *Electrical heating of turnouts, protection from snow and ice*. Tracks and track facilities: site for students and specialists of track facilities. URL: <https://rzd-puteetz.ru/elektroobogrev-strelochnyh-perevodov/> (retrieved on 31.10.2018) (in Russ.).

6. Luchkiv A. I., Ioannidi S. A., Mits S. Yu. *Device for cleaning switch from snow and ice by electrical heating "SEIT-04M"*. Utility patent no. 141261. Moscow, Rospatent, 2014. (in Russ.).

7. In'kov Yu. M., Simonov M. D., Shabalin N. G., Feoktistov V. P. *Device for cleaning switch from snow and ice by electrical heating*. Patent no. 2415988. Moscow, Rospatent, 2011. (in Russ.).

8. Ermolenko D. V., Yuferev L. Yu., Roshchin O. A., Kirin O. Yu. *Device for induction heating of rails and switches (options)*. Utility patent no. 135655. Moscow, Rospatent, 2013. (in Russ.).

ABOUT THE AUTHORS

Dmitriy V. ERMOLENKO,

Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Post-Graduate Department, JSC "VNIIZhT"

Leonid Yu. YUFEREV,

Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Chief Researcher, FGBNU FSAEC VIM

Oleg A. ROSHCHIN,

Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, FGBNU FSAEC VIM

Received 09.11.2018

Accepted 21.01.2019

ДЕЛОВАЯ ИНФОРМАЦИЯ

ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКА КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Программное обеспечение (ПО) «Система экспресс-оценки коэффициента теплопередачи транспортных средств» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017618464 от 01.08.2017) разработано с целью оперативного получения и предоставления информации о соответствии теплотехнического состояния кабин машинистов локомотивов, кузовов изотермических и пассажирских вагонов, моторвагонного подвижного состава, скоростных поездов, а также вагонов метро и автофургонов требованиям НТД.

Область применения ПО

- при проведении предварительных, приемочных, периодических и типовых испытаний в соответствии с ГОСТ 33661–2015;
- при введении транспортного средства в эксплуатацию и проведении ремонта кузова в соответствии с ТУ на тип подвижного состава;
- при введении транспортного средства в эксплуатацию; периодически, но не реже одного раза в 6 лет; по требованию компетентных органов каждой стороны в соответствии с Соглашением о международных перевозках скоропортящихся пищевых продуктов и о специальных транспортных средствах, предназначенных для этих перевозок (СПС).

Перспективы применения ПО

- переход от выборочного к сплошному контролю коэффициента теплопередачи кузова теплоизолированного транспортного средства;
- ведение онлайн электронного теплотехнического паспорта;
- помаршрутное и посезонное планирование энергопотребления;
- мониторинг энергетических потерь и их сокращение на 10–15 %;
- время проведения теплотехнических испытаний по определению величины коэффициента теплопередачи не более 6 ч.



Информация о разработке опубликована в журнале «Вестник ВНИИЖТ»: 2017, Т. 76, № 5; 2018, Т. 77, № 1; можно ознакомиться на сайте издания: <https://vestnik.vniizht.ru/jour>.

Контактная информация: АО «ВНИИЖТ» (<http://www.vniizht.ru/>), E-mail: naumenko.sergei@vniizht.ru; тел. +7(499)260-41-14.