УДК 621.313.5 DOI: 10.34031/ES.2022.2.008

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩАЯ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ СИСТЕМА ЭЛЕКТРООТОПЛЕНИЯ ПАССАЖИРСКОГО ВАГОНА

Ким К.К [1]., Иванов С.Н.[2], Хисматулин М.И.[1]

[1]*ФГБОУ ВО ПГУПС, г. Санкт-Петербург,* [2]*ФГБОУ ВО «КнАГУ», г. Комсомольск-на-Амуре*

Аннотация

Одно из решений вопроса энергосбережения и энергоэффективности на железнодорожном пассажирском транспорте связно с разработкой новых инновационных устройств и систем электрообогрева, обеспечивающих комфортные температурные условия для пассажиров. Рассматривается один из вариантов энергосберегающей и энергоэффективной системы электроотопления на основе теплогенерирующего электромеханического преобразователя, созданного на базе статора обычного асинхронного двигателя и совмещающего функции нагревательного элемента и устройства для перемещения нагреваемого теплоносителя. Устройство предназначено для автономного режима работы. Полезное использование нагрева конструктивных деталей устройства, которое в обычном электромеханическом преобразователе играет негативную роль, обусловливает повышение эффективности работы и КПД устройства и всей системы отопления. На основе теплового и гидравлического расчетов спроектирована система отопления и разработана план-схема расположения выбранных элементов применительно к купейному пассажирскому вагону.

Ключевые слова: *, электронагрев, система отопления, электромеханический преобразователь, жидкий теплоноситель, автономный режим работы, гидравлическое сопротивление, самосмазывающий антифрикционный материал*

THE ENERGY-SAVING AND ENERGY-EFFICIENT ELECTRIC HEATING SYSTEM OF A PASSENGER CAR

Konstantin Kim[1], Sergey Ivanov[2], Marat Khismatulin[1]

[1]*Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint-Petersburg*
[2]*Komsomolsk-na-Amure State University, Komsomolsk-na-Amure*

Abstract

One of the solutions to the issue of energy saving and energy efficiency in railway passenger transport is connected with the development of new innovative devices and electric heating systems that provide the comfortable temperature conditions for passengers. We consider one of the variants of an energy-saving and energy-efficient electric heating system based on the heat-generating electromechanical converter created on the basis of the stator of a conventional asynchronous motor. This converter combins the functions of a heating element and a device for moving the heated coolant. The device is designed for offline operation. The useful use of heating of the structural units of the device, which plays a negative role in a conventional electromechanical converter, leads to an increase in the efficiency of the device and the entire heating system. Based on thermal and hydraulic calculations we have developed a heating system and a layout the scheme of the selected elements in relation to a compartment passenger car.

Keywords: *electric heating, heating system, electromechanical converter, liquid coolant, autonomous mode of operation, hydraulic resistance, self-lubricating antifriction material.*

Введение

В соответствии с материалами Федерального закона № 261-ФЗ разработка и проектирование новых энергосберегающих и энергоэффективных устройств и систем, предназначенных для создания комфортных для человека температурных условий, являются приоритетными задачами для энергетики и транспорта РФ.

В определенной степени указанные задачи решаются использованием электрического способа отопления и переходом от централизованной системы отопления к индивидуальной.

В данной работе рассматривается система такого рода применительно к пассажирскому железнодорожному транспорту.

Суммарная мощность электронагрева, удовлетворяющая требованиям по отоплению вагонов различных заводов, составляет величину порядка 30 – 50 кВт [1-3].

Авторами было предложено для создания таких мощностей использовать инновационный электрический нагреватель с жидким теплоносителем автономного использования (ТЭМП), который представляет собой электромеханический преобразователь, созданный на базе статора обычного асинхронного двигателя (рис. 1) [4].

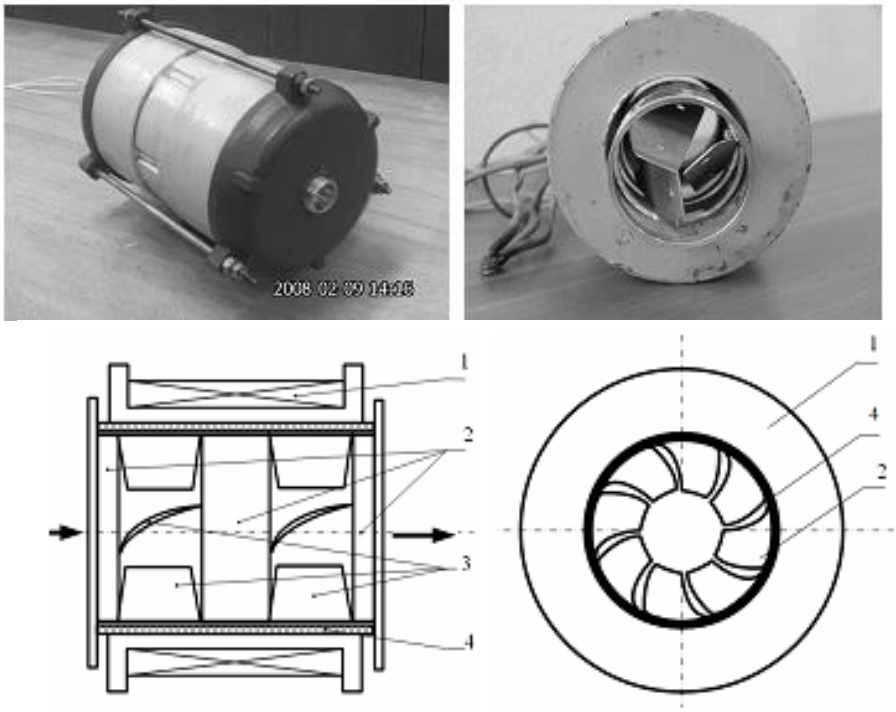

Рис. 1. Фото и конструктивная схема ТЭМП

Материалы и методы

Know-how разработки заключается в следующем: в устройстве отсутствуют традиционные подшипниковые узлы, а их роль выполняет внутренняя поверхность расточки статора с трехфазной обмоткой 1, который выполнен из запатентованного авторами самосмазывающего антифрикционного материала, ротор 2 представляет собой полый цилиндр из немагнитного электропроводящего материала (ВЭ), внутри цилиндра жестко закреплены лопасти 3, вращение которых приводит к возникновению напора жидкого теплоносителя. На части внутренней поверхности расточки статора неподвижно расположена оболочка 4 из электропроводящего немагнитного материала (НЭ). Из-за перечисленных конструктивных особенностей теплоноситель проходит

насквозь нагревателя (через внутреннюю полость ВЭ), что предопределяет его низкое гидравлическое сопротивление. Вихревые токи, возбуждаемые в ВЭ и НЭ под действием вращающегося магнитного поля, приводят к их нагреву и появлению вращающего момента, под действием которого ВЭ и его лопасти приходят в движение, прокачивая теплоноситель. Одновременно с этим теплота с ВЭ и НЭ передается последнему. Т.е. устройство выполняет функции нагревателя и насоса. Следует особо отметить полезное использование нагрева конструктивных деталей устройства, которое в обычном электромеханическом преобразователе играет негативную роль. Это обусловливает повышение эффективности работы и КПД устройства и всей системы отопления, лабораторная установка которой приведена на рис. 2.

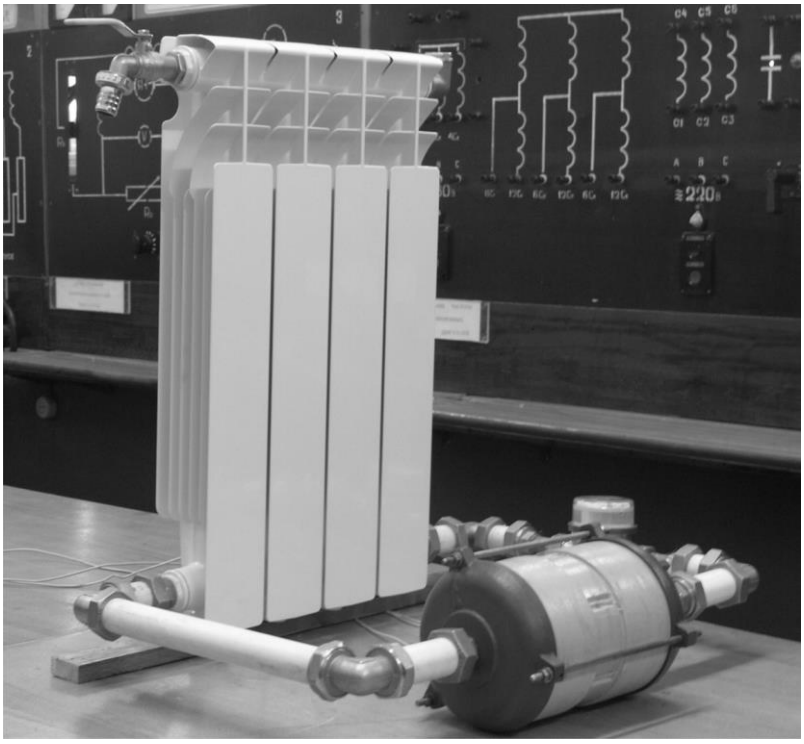

Рис. 2. Лабораторная установка отопительной системы

По предварительной оценке, примерно 85% мощности ТЭМП тратится на нагрев теплоносителя. В установившихся режимах, когда скорость вращения ротора близка к скорости вращающегося магнитного поля, нагревательную функцию в основном выполняет НЭ, а роль в нагреве теплоносителя ВЭ ограничена диапазоном малых скоростей вращения.

Основной задачей, решаемой в данной работе, является разработка системы косвенного электроотопления пассажирского вагона на основе ТЭМП. В ходе работы определялись коэффициенты теплопередачи основных ограждающих конструкций, теплопотери в помещениях вагона и мощность системы отопления, разрабатывались чертежи плана вагона и аксонометрическая схема с отопительными приборами, расчетная схема системы отопления, на основе которой выполнялись гидравлический расчет и расчет отопительных приборов.

На рис. 3 и 4 представлена структура основных ограждающих конструкций пассажирского вагона, использованная при расчете тепловых сопротивлений.

Коэффициенты теплоотдачи для боковых поверхностей и пола составляют λ_1= 58 Вт/(м^2×°С), λ_2= 0,052 Вт/(м^2×°С), λ_3= 0,12 Вт/(м^2×°С), λ_4= 0,13 Вт/(м^2×°С); толщины слоев боковых поверхностей (рис. 4) δ_1= 0,003 м, δ_2= 0,100 м, δ_3= 0,010 м, δ_4= 0,005 м; пола (рис. 5) δ_1= 0,003 м, δ_2= 0,100 м, δ_3= 0,010 м, δ_4= 0,005 м.

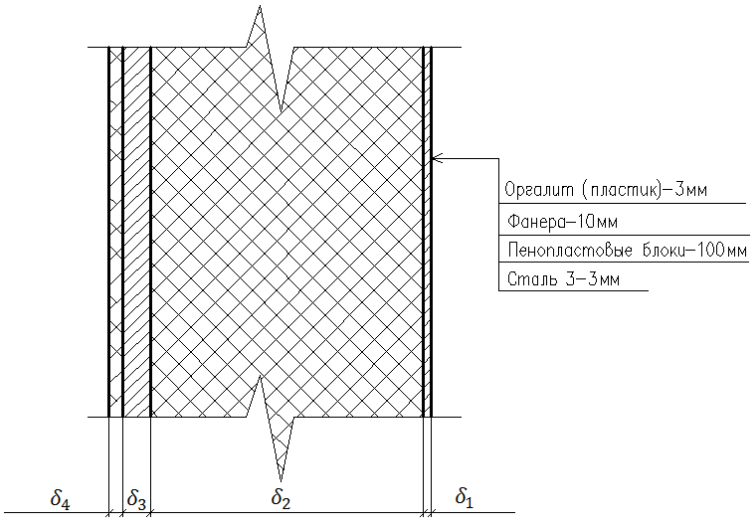

Рис. 3. Структура боковых поверхностей ограждающих конструкций

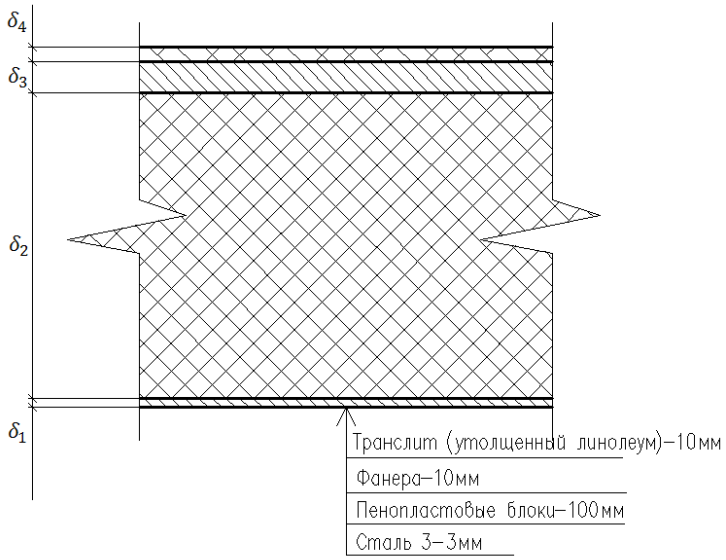

Рис. 4. Структура пола ограждающих конструкций

Для крыши коэффициенты теплопередачи принимались равными для боковых поверхностей, т.к. материалы и их толщины одинаковы [5, 6]. При расчете учитывалась установка двухкамерных стеклопакетов с мягким селективным покрытием.

Определение теплопотерь в помещениях вагона и мощности системы отопления производилось при следующих расчетных температурах: для туалетов +18 °С, тамбуров и коридора +20 °С, купе и служебного помещения +22 °С, расчетная температура наружного воздуха (выбирается максимально низкое значение) -50 °С.

Результаты

Табл. 1 содержит некоторые результаты теплового расчета системы отопления. Расчету подвергалась двухтрубная система водяного отопления вагона с использованием нижней разводки. Установленная мощность системы принималась, равной 22 кВт (стандартное значение). Предполагалось, что ТЭМП выполнен на базе статора электродвигателя 4А180М2У3, имеющего мощность 30 кВт. Температура теплоносителя на выходе и входе в ТЭМП принималась равной Θ_1 = 95 °С, Θ_2 = 70 ^{0}С соответственно. Температура теплоносителя на выходе и входе в ТЭМП принималась равной Θ_1 = 95 °С, Θ_2 = 70 ^{0}С соответственно.

Из табл. 1 можно видеть, что суммарная мощность составляет 20,487 кВт, а для варианта без отопления тамбура – 19,854 кВт. Сопоставление с мощностями нагревательных приборов различных систем, как с котлами комбинированного отопления с 24 высоковольтными нагревательными элементами мощностью 2 кВт каждый, так и электрического отопления (приборы института энергетики Латвии – 36,8 кВт; приборы Нижнеднепровского ВРЗ – 50,6 кВт; межобластной вагон постройки Польши – 48 кВт) свидетельствует об экономии в потреблении электроэнергии, необходимой для отопления вагона.

Таблица 1

Расчет мощности отопительных приборов

№ помещения	Тип помещения	Температура внутренняя, °С	Ограждающие конструкции			Площадь, м²	$Q_{пом.}$ Вт
			элементы	размеры			
				длина	ширина		
1, 13	туалет	18	нар. ст. пол окно потолок	1,15 1,15 0,64 1,15	2,3 1,3 0,8 1,3	2,65 1,50 0,51 1,50	412
2	служебное помещение	22	нар. ст. пол потолок окно	1,9 1,9 1,9 0,64	2,3 1,5 1,5 0,8	4,37 2,85 2,85 0,51	786
3…12	купе	22	нар. ст. пол потолок окно	1,8 1,8 1,8 0,96	2,3 2,1 2,1 0,8	4,14 3,78 3,78 0,77	1253
14	тамбур	20	нар. ст. пол потолок окно	1,15 1,15 1,15 0,64	2,3 1,55 1,55 0,8	2,65 1,78 1,78 0,51	633
15	коридор	20	нар. ст. пол потолок окно 1 окно 2 … окно 10	18 18 18 0,64 0,96 … 0,96	2,3 0,75 0,75 0,8 0,8 … 0,8	41,40 13,50 13,50 0,51 0,77 … 0,77	4753
16	тамбур	20	нар. ст. пол потолок окно	3,05 3,05 3,05 0,64	2,3 1,45 1,45 0,8	7,02 4,42 4,42 0,51	969
Суммарная мощность, Вт							20487

Для выполнения гидравлического расчета составлен план вагона с теплопроводами и отопительными приборами, приведенный на рис. 5. Номера участков на схеме обозначены одним числом в конце полки линии выноски. Там же указана тепловая нагрузка в числителе, длина участка, м, и диаметр трубы, мм – в знаменателе. Тепловая нагрузка участка – суммарная тепловая нагрузка отопительных приборов, обслуживаемых расчетным участком.

Гидравлический расчет проводится по двум циркуляционным кольцам и сводился к подбору диаметров труб с обеспечением суммарных потерь напора в системе, не превышающих расчетное циркуляционное давление.

Для упрощения подбора диаметров труб определялись средние удельные потери давления по расчетным циркуляционным кольцам.

По расходу теплоносителя, средним удельным потерям давления и расчетным таблицам подбирались оптимальные значения диаметров труб, скорость движения по ним и удельные потери давления. Результаты гидравлического расчета для первого и второго циркуляционного кольца приведены соответственно в табл. 2, 3 [7].

В качестве радиаторов для проектируемой системы выбраны настенные конвекторы без кожуха. Принимались стандартные условия работы. С учетом номинальной плотности температурного напора отопительного прибора и температуры в помещении выполнялся расчет площади теплоотдающей поверхности.

а - план вагона с теплопроодами и отопительными приборами

б - аксонометрическая схема системы отопления с узлом привязки теплогенератора

Рис. 5. План вагона и схема системы отопления

Таблица 2

Ведомость гидравлического расчета системы отопления

Номер участка	Тепловой поток, Вт	Длина участка l, м	Расход тепл-ля , кг/м	Диаметр трубы d, мм	Скорость движ-я воды W, м/с	Сумма коэф. мест. сопротивлений	Потери давления, Па			
							на 1 м трубы R	на длину участка Rl	в местных сопрот-х Z	суммарные по участку $P_{уч}$
1	633	1,45	16,7	15	0,023	6,4	1,45	2,1	1,95	4,05
2	1108	1,8	29,3	15	0,040	1,5	2,50	4,5	1,17	5,67
3	1583	1,8	41,8	15	0,047	1,5	3,70	6,67	1,59	8,26
4	2058	1,8	54,4	15	0,073	2,5	8,20	14,76	4,00	18,76
5	2533	1,8	66,9	20	0,051	1,5	2,40	4,32	1,76	6,08
6	3008	1,8	79,5	20	0,062	1,5	3,90	7,02	2,66	9,68
7	3483	1,8	92,0	20	0,070	1,5	5,60	10,08	3,59	13,67
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
25	1108	1,8	29,3	15	0,040	1,5	2,50	4,5	1,17	5,67
26	404	1,45	16,7	15	0,023	5,4	1,45	2,1	1,40	3,50
Σl = 44,1 м							$\Sigma P_{уч}$ = 343,7 Па			

В качестве радиаторов для проектируемой системы выбраны настенные конвекторы без кожуха. Расчет площади теплоотдающей поверхности производится через расчетную плотность теплового потока отопительного прибора исходя из номинальной плотности при стандартных условиях работы, температурного напора, равного разности полусуммы теплоносителя на входе и выходе отопительного прибора, и температуры воздуха в помещении.

Таблица 3

Ведомость гидравлического расчета системы отопления

Номер участка	Тепловой поток, Вт	Длина участка l, м	Расход тепл-ля , кг/м	Диаметр трубы d, мм	Скорость движ-я воды W, м/с	Сумма коэф. мест. сопротивлений	Потери давления, Па			
							на 1 м трубы R	на длину участка Rl	в местных сопрот-х Z	суммарные по участку $P_{уч}$
1	404	1,4	10,7	15	0,014	6,4	0,92	1,29	0,70	1,99
2	1657	1,8	43,8	15	0,059	2,5	4,20	7,56	4,40	11,96
3	2910	1,8	76,9	20	0,059	1,5	3,50	6,30	2,62	8,92
4	4163	1,8	110,0	20	0,083	2,5	7,75	13,95	8,87	22,82
5	5416	1,8	143,1	25	0,066	1,5	3,60	6,48	3,16	9,64
6	6669	1,8	176,2	25	0,081	1,5	5,80	10,44	4,73	15,17
7	7922	1,8	209,3	25	0,096	1,5	7,20	12,96	6,71	19,67
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
25	4163	1,8	110,0	20	0,083	1,5	7,75	13,95	3,98	17,93
26	2910	1,8	76,9	20	0,059	2,0	3,50	6,30	3,38	9,68
27	1657	1,8	43,8	15	0,059	1,5	4,20	7,56	2,62	10,18
28	404	1,4	10,7	15	0,014	5,4	0,92	1,29	0,59	1,88
Σl = 49,6 м						$\Sigma P_{уч}$ = 437,8 Па				

Результаты расчетов необходимой площади теплоотдающей поверхности представлены в табл. 4.

Таблица 4

Расчет площади отопительных приборов

№	$Q_{пом}$, Вт	t_{int}, °С	Температура теплоносителя, °С		Температурный напор $\Delta t_{ср}$, °С	Расход теплоносителя $G_{пр}$, кг/с	$q_{пр}$, Вт/м²	$F_{пр}$, м²	Тип конвектора
			вход	выход					
1	412	18			64,5	0,017	674,0	0,66	15К1-0,4
2	786	22			60,5	0,031	647,1	1,30	15К1-0,6
3	1253	22			60,5	0,050	665,9	2,02	15К1-1,0
.	.	.			.	.	.	.	.
12	1253	22			60,5	0,050	665,9	2,02	15К1-1,0
13	404	18	95	70	64,5	0,016	671,6	0,64	15К1-0,4
14	633	20			62,5	0,025	664,2	1,02	15К1-0,5
15	475	20			62,5	0,019	653,4	0,78	15К1-0,4
16	969	20			62,5	0,039	682,2	1,52	15К1-0,7

Выводы

Сравнение полученных результатов с технико-экономическими показателями традиционных систем отопления подтверждает возможность эффективного применения ТЭМП в качестве источников тепловой энергии и может рассматриваться как один из энергоэффективных и энергосберегающих вариантов при создании и эксплуатации отопительного оборудования пассажирского железнодорожного транспорта. Следует отметить, что возможны два варианта использования ТЭМП: каждое купе (или группа) снабжается отдельным теплогенератором или используется один ТЭМП большой мощности на весь вагон. В первом случае дополнительная экономия электроэнергии достигается отапливанием только тех купе, в которых есть пассажиры, в остальных помещения поддерживается дежурная температура за счет теплообмена с отапливаемыми купе, либо ТЭМПы этих помещений работают не на полную мощность.

Библиографический список

1. Ёлшин А.И., Казанский В.М., Клесов В.И. Безопасные индцукционные электронагреватели для отопления и горячего водоснабжения // Электротехника. 1999. № 11. С. 50-52.
2. Корабельников Ю.Г. Релаксационный эффект и характер накопления повреждений в полиметлетакрилате при статических нагрузках // Механика полимеров. 1971. № 4. С. 40-44.
3. Филипов И.Ф. Теплообмен в электрических машинах. Л.: Энергоатомиздат, 1986. 256 с.
4. Кузьмин В.М., Сериков А.В. Разработка и исследование трансформаторов для установок электронагрева // Электротехника. 2001. № 7. С. 45-51.
5. Кучинксий Г.С. Надежность и долговечность полимерной изоляции импульсных кабелей при ограниченном сроке службы // Электричество. 1978. № 9. С. 80-83.
6.Ким К.К., Приходченко О.В., Просолович А.А. Исследование процессов массо- и теплообмена в совмещенных энергетических устройствах методами визуального анализа // Ученые записки КнАГТУ. 2014. № I-1(17). С. 22-29. EDN: SHCSYF
7. Иванов С.Н., Ким К.К., Кузмин В.М. Теплогенерирующие электромеханические устройства и комплексы. Санкт-Петербург: ООО «Издательство ОМ-Пресс», 2009. 348 с.

References

1. Elshin, A., Kazansky, V., & Klesov, V. (1999). Bezopasnyye induktsionnyye elektronagrevateli dlya otopleniya i goryachego vodosnabzheniya [Safe induction electric heaters for heating and hot water supply]. *Electrical engineering*, *11,* 50-52. [In Russian]
2. Korabelnikov, Yu. (1971). Relaksatsionnyy effekt i kharakter nakopleniya povrezhdeniy v polimetletakrilate pri staticheskikh nagruzkakh [The relaxation effect and the nature of damage accumulation in polymetetacrylate under static loads]. *Mechanics of polymers*, *4,* 40-44. [In Russian]
3. Filippov, I. (1986). *Teploobmen v elektricheskikh mashinakh* [*Heat transfer in electric machines*]. Energoatomizdat. [In Russian]
4. Kuzmin, V., & Serikov, A. (2001). Razrabotka i issledovaniye transformatorov dlya ustanovok elektronagreva [Development and research of transofrmators for electric heating installations]. *Electrical engineering*, *7,* 45-51. [In Russian]
5. Kuchinksiy, G. (1978). Nadezhnost' i dolgovechnost' polimernoy izolyatsii impul'snykh kabeley pri ogranichennom sroke sluzhby [Reliability and durability of polymer insulation of pulse cables with a limited-service life]. *Electricity*, *9,* 80-83. [In Russian]
6. Kim, K., Prikhodchenko, & O., Prosolovich, A. (2014). Issledovaniye protsessov masso- i teploobmena v sovmeshchennykh energeticheskikh ustroystvakh metodami vizual'nogo analiza [Investigation of mass and heat transfer processes in combined energy devices by methods of visual analysis]. *Scientific notes of KnAGTU, I-1(17)*, 22-29. [In Russian]
7. Ivanov, S., Kim, K., & Kuzmin, V. (2009). *Teplogeneriruyushchiye elektromekhanicheskiye ustroystva i kompleksy* [*Heat-generating electromechanical devices and complexes*]. Publishing House OM-Press, LLC. [In Russian]

Сведения об авторах

Ким Константин Константинович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Электротехника и теплоэнергетика». Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВО ПГУПС).
E-mail: kimkk@inbox.ru, ORCID: 0000-0001-7282-4429

Иванов Сергей Николаевич, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры «Электромеханика». Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет».
ORCID: 0000-0002-9964-9111

Хисматулин Марат Ильдусович, аспирант кафедры «Электротехника и теплоэнергетика». Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВО ПГУПС).
ORCID: 0000-0002-5680-5524

Authors about

Konstantin Kim, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Electrical Engineering and Heat Power Engineering, Federal State Budget Educational Institution for Higher Education «Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University» (PGUPS), e-mail: kimkk@inbox.ru.
ORCID: 0000-0001-7282-4429

Sergey Ivanov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of "Electromechanics", Federal State-Financed Educational Institution of Higher Learning "Komsomolsk-na-Amure State University".
ORCID: 0000-0002-9964-9111

Marat Khismatulin, postgraduate student of the Department of Electrical Engineering and Heat Power Engineering, Federal State Budget Educational Institution for Higher Education «Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University» (PGUPS).
ORCID: 0000-0002-5680-5524