

УДК 621.315 Т38

Т.В. Костыгова, Ю.П. КурочкинаПермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия**РАСЧЕТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА ЭМАЛИРОВАНИЯ
И ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ИЗОЛЯЦИИ ПО ТЕМПЕРАТУРНОЙ
КРИВОЙ $\text{tg } \delta$**

Приведен расчет технологического процесса эмалирования провода ПЭЭИД-2-200 диаметром 0,56 мм, эмалированном на эмалиагрегате *Delta H4 SB*. Рассчитаны температура провода, степень пленкообразования и термоокислительной деструкции, проведена оценка качества провода по температурной зависимости тангенса δ на устройстве TD-5.

Ключевые слова: эмалирование, температура, растворитель, пленка, деструкция, скорость, качество.

T.V. Kostygova, Yu.P. Kurochkina

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**CALCULATION OF THE TECHNOLOGICAL MODE
OF ENAMELING AND THE ASSESSMENT OF QUALITY
OF ISOLATION ON THE TEMPERATURE CURVE OF $\text{tg } \delta$**

This paper presents a calculation of process conditions enameling wire PEEID-2-200, 0,56 mm diameter enamel unit *Delta H4 SB*. Calculated temperature of the wire, the power of film and termokislitelnoy destruction, assessed the quality of the wires on the temperature dependence of $\text{tg } \delta$ on the device TD-5.

Keywords: enamelling, temperature, solvent, film formation, destruction, speed, quality.

Обмоточные провода широко применяются в различных отраслях промышленности, начиная от миниатюрных электромеханических часов, микрореле космических аппаратов и заканчивая крупными электрическими машинами и трансформаторами. Надежность и экономичность этих устройств зависят от технического уровня и качества обмоточных проводов. Основную группу обмоточных проводов составляют эмалированные провода, обладающие по сравнению с другими видами повы-

шенной электрической прочностью и нагревостойкостью, меньшей толщиной изоляции, более высокой стойкостью к действию влаги и т.д.

В настоящее время в мире наблюдается постоянный рост производства обмоточных проводов. На сегодняшний день темпы роста проводов с эмалевой изоляцией составляют примерно 40 % к объему выпуска в 1990 г.

В кабельной промышленности России сегодня производится более 70 % проводов с температурным индексом 155–200 °С, что соответствует мировой структуре производства. Динамика изменения структуры производства эмалированных проводов по классам нагревостойкости показана на рис. 1.

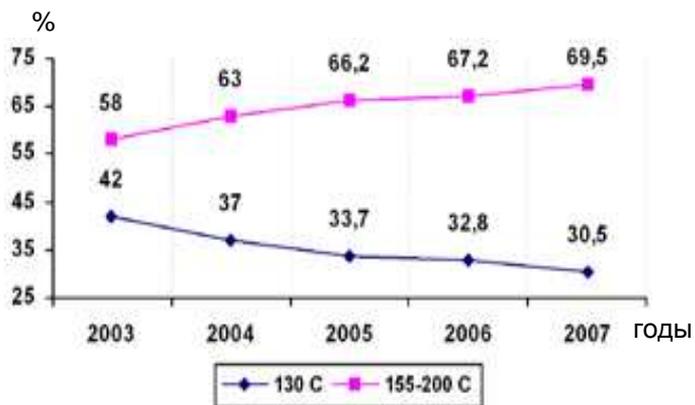


Рис. 1. Динамика изменения структуры производства эмалированных проводов по классам нагревостойкости

Это достигнуто за счет технического перевооружения заводов и потребления высококачественных импортных лаков.

Эмалирование проволоки производится на современном оборудовании.

Преимуществами современных эмальагрегатов являются:

- совмещение волочения и эмалирования;
- высокая степень каталитического дожигания отходящих газов – до 99 %;
- стабильность технологических параметров;
- большевесная отдающая и приемная тара;
- меньший расход электроэнергии на 1 кг готового провода;
- высокие скорости эмалирования.

Характеристики современных агрегатов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики современных агрегатов

Параметр	Delta H4 SB	Mate SV 70-224/2	3XCV1500
Диаметр изолируемой жилы, мм:	0,315-1,000	0,710-2,240	1,000-4,000
Число линий	2	4	3
Максимальное количество слоев лака наносимых на проволоку	22	20 (4+12+4)	24 (16+4+4)
Количество лаковых баков	3 (1 общий)	5 (1 общий)	4 (1 общий)
Количество печей отжига (на 1 линию)	1	1	2 (перед и после волочения)
Количество эмальпечей (на 1 линию)	1	1	1
Электрическая мощность, общая, кВт	153	450	450
Максимальный диаметр подтяжки, мм	1,60	3,5	4,00
V·D (производительность)	100–170	100	100
Тип отдающих катушек, D щеки, мм	560,630,корзины	560, 630, корзины	560,630
Тип приемных катушек, D щеки, мм	250,355, 250/400, 315/500, 400/630	250,355, 250/400, 315/500, 400/630	250, 355, 250/400, 315/500, 400/630
Габариты оборудования (длина, ширина, высота), м	36×4×3,5	28,5×6,36×16,67	21×6×23

Технологическая цепочка изготовления эмалированных проводов представлена на рис. 2.

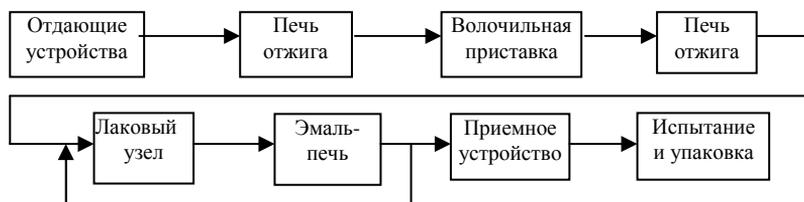


Рис. 2. Технологическая цепочка изготовления эмалированных проводов

Одним из наиболее прогрессивных эмалированных проводов является провод ПЭЭИД-2-200. Эмалированный провод марки ПЭЭИД2-200-МЭК выпускается по ТУ 16 К71-250-95. Конструкция провода приведена на рис. 3.

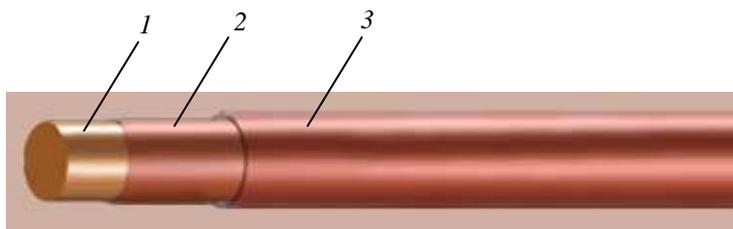


Рис. 3. Конструкция провода ПЭЭИД2-200: 1 - медная токопроводящая жила; 2 – нижний слой эмалевой изоляции на основе полиэфиримидов; 3 – верхний слой эмалевой изоляции на основе полиамидимидов

Уровень технических требований к проводу соответствует международным стандартам МЭК 60317-0-1 и МЭК 60317-3.

ПЭЭИД-2-200-МЭК – провод медный, круглый, эмалированный, с двухслойной изоляцией на основе полиэфиримидов, с покрытием полиамидимидом, с толщиной изоляции типа 2, с температурным индексом 200.

Важно правильно выбрать и рассчитать технологический режим эмалирования. Для этого необходимо знать распределение температуры в эмальпечи.

Температуру эмалированной проволоки можно рассчитать по температуре термопары, разбив эмальпечь на равные участки [1]:

$$T_{\text{пр}n} = T_{\text{тн}} - (T_{\text{тн}} - T_{\text{пр}n-1}) \cdot \exp\left(-\frac{a_{1n} + \alpha_{\text{пр}n}}{A} \cdot \Delta h\right), \quad (1)$$

где $T_{\text{тн}}$ – температура термопары на n -м участке печи; a_{1n} – коэффициент, учитывающий тепловое излучение, $a_{1n} = \varphi \varepsilon_{\text{пр}} C_0 \frac{T_{\text{тн}}^4 - T_{\text{пр}n-1}^4}{T_{\text{тн}} - T_{\text{пр}n-1}}$; $\alpha_{\text{пр}}$ –

коэффициент конвективной теплоотдачи от воздуха к проволоке; φ – коэффициент облученности проволоки, $\varphi = 0,95$; $\varepsilon_{\text{пр}}$ – коэффициент черноты; C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, $C_0 = 5,7 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$;

Для расчета температуры проволоки $T_{\text{пр}}$ необходимо знать коэффициент черноты проволоки ε и коэффициент конвективной теплоотдачи $\alpha_{\text{к}}$ от воздуха к проволоке. Коэффициент черноты проволоки ε зависит от толщины эмалированного слоя на проволоке. Коэффициент

конвективной теплоотдачи α_k от воздуха к проволоке можно рассчитать с помощью критериального уравнения теории теплоотдачи. В условиях вынужденной конвекции критерий Нуссельта определяется как

$$\text{Nu} = c \text{Re}^m, \quad (2)$$

где c, m – коэффициенты, которые выбираются в зависимости от величины Re ($c = 0,49; m = 0,5$ для эмалированных проводов).

Критерий Рейнольдса можно определить из выражения

$$\text{Re} = \frac{V_{\text{вн}} d}{\nu_{\text{в}}}, \quad (3)$$

где $V_{\text{вн}}$ – скорость воздуха в эмали-печи относительно проволоки, м/с; d – диаметр проволоки, м; $\nu_{\text{в}}$ – кинематическая вязкость воздуха, м²/с.

При эмалировании проводов на эмали-агрегатах с каталитическим сжиганием газов и рекуперацией тепла в первой половине эмали-печи направление воздушного потока совпадает с направлением движения проволоки, а во второй половине печи воздушный поток направлен против движения проволоки.

$V_{\text{вн}} = |V_{\text{эм}} - V_{\text{в}}|$, если направления воздушного потока и движения проволоки совпадают.

$V_{\text{вн}} = V_{\text{эм}} + V_{\text{в}}$, если эти направления противоположны.

Обычно в эмали-печи известна $V_{\text{в}}$ только в первой точке, т.е. V_0 при температуре T_0 .

Зная эти величины, можно рассчитать скорость воздуха в любой точке печи:

$$V_{\text{в}} = V_0 \frac{T_{\text{вн}}}{T_{\text{в0}}}. \quad (4)$$

Критерий Нуссельта можно найти из следующего выражения:

$$\text{Nu} = \frac{\alpha_{\text{пр}} d}{\lambda_{\text{в}}}, \quad (5)$$

где $\lambda_{\text{в}}$ – теплопроводность воздуха, Вт/(м·°С).

Используя формулы (2) и (5) для расчета коэффициента конвективной теплоотдачи, можно получить следующие выражение:

$$\alpha_{\text{пр}} = 0,49 \lambda_{\text{в}} \left(\frac{V_{\text{вн}}}{d_{\text{пр}} \nu_{\text{в}}} \right)^{0,5}. \quad (6)$$

Для правильного выбора скорости эмалирования необходимо рассчитать процесс пленкообразования и деструкции изолированного покрытия эмалированных проводов

За основу оценки процесса пленкообразования было принято понятие «степень завершенности реакции пленкообразования». Степень завершенности реакции пленкообразования A определяется числом связей в единице объема, образовавшихся между соседними макромолекулами, составляющими основу эмальлака и вступающими в реакцию при пленкообразовании.

Степень пленкообразования изменяется по проходам. Первый слой эмалированной пленки будет иметь большую степень пленкообразования, так как он проходит через эмаль-печь большее количество раз, а последний – меньшую, так как он проходит лишь один раз.

Степень завершенности реакции пленкообразования с учетом количества проходов при первом порядке реакции пленкообразования определяется по формуле [2–4]

$$A = 1 - \exp \left(- \sum_j^k \sum_1^n \frac{k_{01} \exp(\beta_1 \tau_{n-1})}{\beta_1 V_{\text{нн}}} [\exp(\beta_1 V_{\text{нн}} t_n) - 1] \right), \quad (7)$$

где j – номер прохода; k – общее количество проходов; k_{01} , β_1 – коэффициенты которые зависят от типа эмаль-лака; $V_{\text{нн}}$ – скорость нагрева провода на n -м участке; τ – температура, °C; t – время, с.

Степень деструкции можно рассчитать аналогично, так как разрушение связей подчиняется тем же законам, что и их образование:

$$B_j = 1 - \exp \left(- \sum_j^k \sum_1^n \frac{k_{02} \exp(\beta_2 \tau_{n-1})}{\beta_2 V_{\text{нн}}} [\exp(\beta_2 V_{\text{нн}} t_n) - 1] \right),$$

где β_2 , k_{02} – коэффициенты, характеризующие деструкцию.

При одинаковой толщине эмалированного слоя, наносимого за каждый проход,

$$A_{\text{ср}} = \frac{A_1 + A_2 + \dots + A_k}{k},$$

где A_1, A_2, \dots, A_k – СПО по 1, 2 и k -му проходам.

Путем корреляции электрических и физико-механических характеристик изоляции эмалированных проводов было установлено, что эмальевое покрытие удовлетворяет требованиям ГОСТа при средней

степени завершенности реакции пленкообразования $A_{cp} \geq 0,75$ и средней степени деструкции $B_{cp} \leq 0,15$. Кроме того, верхний слой изоляции должен иметь степень завершенности реакции пленкообразования $A_k \geq 0,5$, в противном случае при тепловом испытании происходит слипание изоляции.

Расчет технологического диапазона эмалирования сводится к расчету минимальной и максимальной скорости эмалирования.

Результаты расчета для провода ПЭЭИД-2-200 диаметром 0,56 мм на эмалиграте *Delta H4 SB* приведен на рис. 4. Программа расчета составлена на языке *Pascal*.

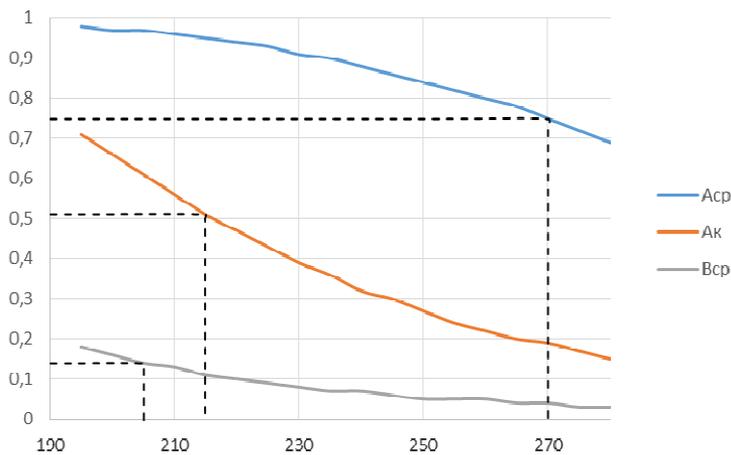


Рис. 4. Зависимость степени пленкообразования и степени деструкции от скорости эмалирования для диаметра 0,56: A_{cp} – средняя степень пленкообразования; A_k – степень пленкообразования последнего слоя; B_{cp} – средняя степень деструкции

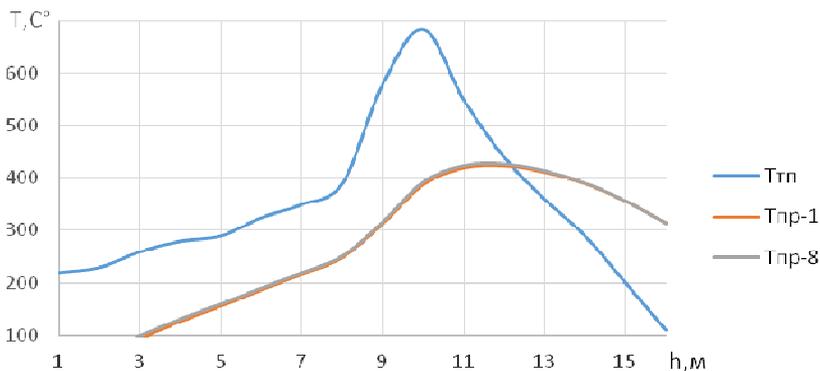


Рис. 5. Распределение температуры провода и термопары по длине печи для диаметра 0,56 мм: 1 – температура термопары; 2 – температура проволоки на первом проходе; 3 – температура проволоки на последнем проходе

Как видно из расчетов $V_{\min} = 198$, $V_{\max} = 215$. Эмалирование проволоки обычно ведут при оптимальной скорости эмалирования, которая меньше максимальной скорости на допуск.

Для определения соответствия у эмалированного провода качественной изоляции используют испытания на измерителе угла диэлектрических потерь TD- δ .

Принцип работы устройства состоит в постепенном нагреве в нагревательной камере контролируемого образца эмалируемого провода с одновременным измерением тангенса дельта. По полученным данным на монитор компьютера выводится график кривой тангенса дельта. Далее полученный график анализируется и сравнивается с эталонными кривыми (рис. 5).

Правильное запекание изоляции провода гарантирует, что провода будут соответствовать заявленным характеристикам на протяжении всего срока службы (не менее 20000 ч). Правильное запекание изоляции невозможно однозначно определить с помощью традиционных методов испытаний (механическая прочность, пробивное напряжение и т.д.). Контроль данного параметра позволит убедиться в качественном запекании изоляции. Однако следует понимать, что контроль тангенса дельта не может определить такие несоответствия в изоляции провода, как горелые наплывы, механические повреждения, овальность и т.д.

Недостаточное запекание означает, что в толще изоляции осталось значительное количество растворителей. Это может привести к тому, что провод, прошедший успешно все испытания, через некоторое время (например, после хранения на складе потребителя) резко ухудшит свои характеристики – снизится пробивное напряжение, ухудшится эластичность изоляции (осыпание) и т.д. Также при этом снижается стойкость изоляции к воздействию химикатов (пропиточных лаков), ухудшается механическая прочность, что может проявиться в увеличении количества электрических замыканий витков провода при изготовлении обмоток электродвигателей.

Излишнее запекание так же опасно, как и недостаточное. В этом случае изоляция становится ломкой, что может привести к микротрещинам при намотке обмоток электродвигателей и, следовательно, к увеличению количества электрических замыканий. Помимо этого излишнее запекание ведет к потере адгезии изоляции с поверхностью проволоки.

Таким образом, определение правильности термообработки изоляции является очень важным процессом.

Анализ кривых тангенса дельта осуществляется на основе данных по лакам, полученных от фирм производителей. Типичная кривая показана на рис. 6.

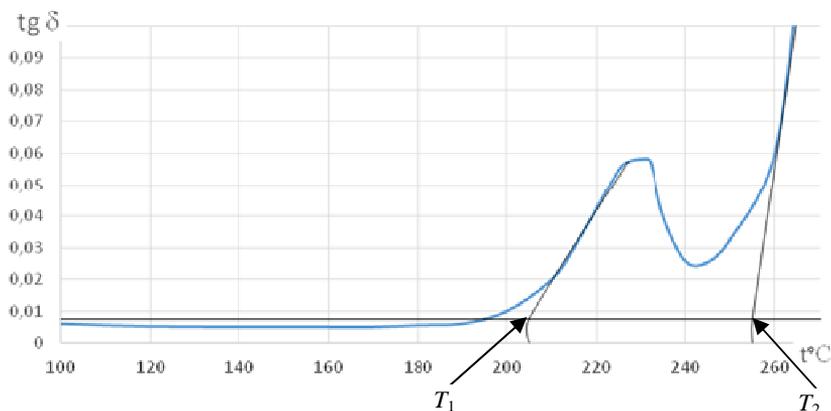


Рис. 6. Температурная зависимость угла диэлектрических потерь

На рис. 6 на кривой программой автоматически выделяются 2 характерные точки – T_1 и T_2 . Эти точки определяются температурным индексом используемых лаков. Цель оператора состоит в сравнении полученных величин в характерных точках с паспортными значениями. Также необходимо контролировать форму кривой – она должна быть плавной, непрерывной, без резких скачков. Ниже приведены примеры значений T_1 и T_2 для различных типов лака.

Марка лака	T_1 , °C	T_2 , °C
<i>Terebec MT + Sivamid</i>	205–220	>250

Если полученные значения не укладываются в вышеприведенные диапазоны, то возможны 2 варианта:

1-й – температурная кривая смещена влево, температура в точке T_1 меньше нормативного значения. Это означает, что недостаточная температура в эмальпечи или высокая скорость эмалирования.

2-й – температурная кривая смещена вправо, температура в точке T_1 больше нормативного значения. Это означает, что происходит излишнее запекание изоляции, необходимо увеличить скорость эмалирования.

Далее рассматриваются примеры различных несоответствий.

На рис. 7 приведен пример завышенной скорости при использовании лака *Terebec MT*. Видно, что величина T_1 значительно ниже нормативного значения в 205–220 °С.

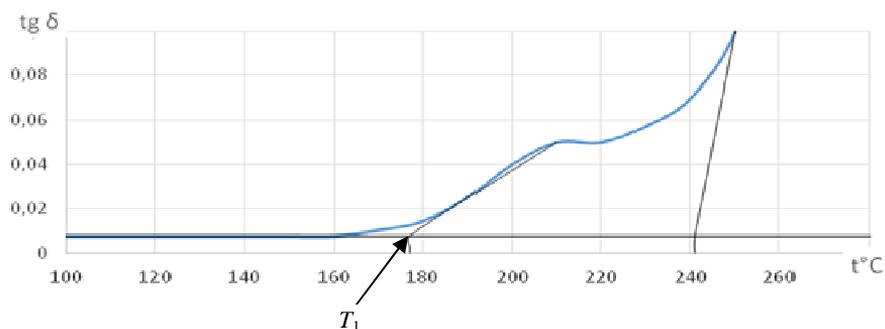


Рис. 7. Температурная зависимость угла диэлектрических потерь

На рис. 8 приведен пример, заниженной скорости эмалирования.

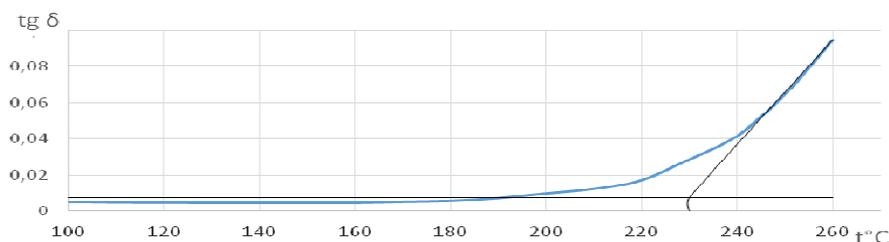


Рис. 8. Температурная зависимость угла диэлектрических потерь

Следует отметить, что первым шагом при появлении несоответствующих кривых являются повторные испытания с тщательной подготовкой образцов.

Библиографический список

1. Пешков И.Б. Обмоточные провода. – М.: Энергоатомиздат, 1995.
2. Кассихин Л.И., Холодный С.Д. Исследование процесса удаления растворителя из эмалевых лаков // Электротехническая промышленность. Сер. Кабельная техника. – 1977. – № 10.
3. Борщевский С.Г., Кассихин Л.И. Расчет оптимальной скорости эмалирования на стадии удаления растворителя / Перм. политехн. ин-т. – Пермь, 1986. Деп. в Информэлектро, № 313-ЭТ.

4. Борщевский С.Г., Холодный С.Д., Кассихин Л.И. Исследования и расчет пленкообразования при эмалировании / Перм. политехн. ин-т. – Пермь, 1987. Деп. в Информэлектро, № 727-ЭТ.

References

1. Peshkov I.B. Obmotochnye provoda [Winding wire]. Moscow: Energoatomizdat, 1995.

2. Kassikhin L.I., Kholodnyi S.D. Issledovanie protsessa udaleniia rastvoritel'ia iz emalevykh lakov. *Elektrotekhnicheskaiia promyshlennost'. Kabel'naiia tekhnika*, 1977, no. 10.

3. Borshchevskii S.G., Kassikhin L.I. Raschet optimal'noi skorosti emalirovaniia na stadii udaleniia rastvoritel'ia [Calculating optimal speed enamelling step solvent removal]. Permskii politekhnicheskii institut, 1986.

4. Borshchevskii S.G., Kholodnyi S.D., Kassikhin L.I. Issledovanie i raschet plenkoobrazovaniia pri emalirovanii [Investigation and calculation of film with enameling]. Permskii politekhnicheskii institut, 1987.

Сведения об авторах

Костыгова Татьяна Васильевна (Пермь, Россия) – доцент кафедры конструирования и технологии в электротехнике Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: ktei@pstu.ru).

Курочкина Юлия Павловна (Пермь, Россия) – студентка гр. КТЭИ-09 электротехнического факультета Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: yulia2037@yandex.ru).

About the authors

Kostygova Tatyana Vasilyevna (Perm, Russia) – Associate Professor of the Department of design and technology in electrical engineering Perm National Research Politechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: ktei@pstu.ru).

Kurochkina Julia Pavlovna (Perm, Russian Federation) – Student gr. KTEI-09 Faculty of Electrical Engineering Perm National Research Politechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: yulia2037@yandex.ru).

Получено: 26.03.2014