

Copyright © 2015 by Academic Publishing House Researcher



Published in the Russian Federation  
European Journal of Technology and Design  
Has been issued since 2013.

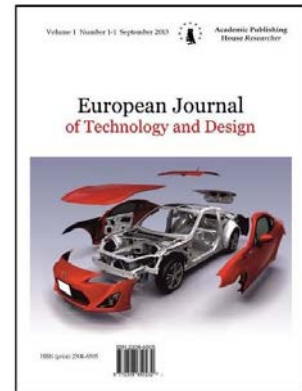
ISSN: 2308-6505

E-ISSN: 2310-3450

Vol. 9, Is. 3, pp. 98-106, 2015

DOI: 10.13187/ejtd.2015.9.98

[www.ejournal4.com](http://www.ejournal4.com)



UDC 621.311.001.57+621.315

### **By Development of Express Methodic for Determining the Stationary Thermal Conditions Models Parameters of Aerial Lines**

<sup>1</sup>Anton B. Petrochenkov

<sup>2</sup>Alexandr V. Romodin

<sup>3</sup>Dmitriy Yu. Leizgol'd

<sup>4</sup>Mikhail S. Borisov

<sup>1</sup>Perm National Research Polytechnic University, Russian Federation  
Komsomolsky prospect 29, Perm, Perm Krai, 614990

PhD (technical), associate professor

E-mail: [pab@msa.pstu.ac.ru](mailto:pab@msa.pstu.ac.ru)

<sup>2</sup>Perm National Research Polytechnic University, Russian Federation  
Komsomolsky prospect 29, Perm, Perm Krai, 614990

PhD (technical), associate professor

E-mail: [romodin@mail.ru](mailto:romodin@mail.ru)

<sup>3</sup>Perm National Research Polytechnic University, Russian Federation  
Komsomolsky prospect 29, Perm, Perm Krai, 614990

PhD student, assistant

E-mail: [dmleyz@mail.ru](mailto:dmleyz@mail.ru)

<sup>4</sup>Perm National Research Polytechnic University, Russian Federation  
Komsomolsky prospect 29, Perm city, Perm, 614990

E-mail: [mihail.borisov.1993@mail.ru](mailto:mihail.borisov.1993@mail.ru)

#### **Abstract**

The article deals with the determining value of the steady heating of the air line under load. The authors proposed to determine the value of the steady-heating based on real experimental data. To obtain the equation of the heating process were built and analyzed according to steady heating of each environment parameter. Besides that, an algorithm which described steps to creation characteristic curve the steady heating by external factors. The reliability analyze of obtained results, which made by the Fisher test, showed that the proposed model is adequate ( $F$  less  $F_{kr}$  more than 4 times). The introduced approach can be used to develop steady state heat conductors models with a sufficiently high accuracy by a low cost of time to collect the necessary data.

**Keywords:** compelled convection, stationary thermal conditions, the equation of thermal balance.

#### **Введение**

Установившееся значение нагрева находится на основании численного решения уравнения теплового баланса [1-3] или, считая постоянным коэффициент теплопередачи проводника и его сопротивление, принимается равным произведению допустимого

превышения нагрева на квадрат отношения тока нагрузки к допустимому току [4-6]. Уравнение теплового баланса нелинейно и требует для решения численные или аналитические методы, которые в свою очередь имеют свои недостатки [7]. Подход, описанный в [4-6], ведет к погрешностям за счет того, что он не учитывает ни один из параметров окружающей среды, кроме температуры. Оба эти подхода имеют общий недостаток – допущения при построении расчетных выражений. Таким образом, актуальной задачей становится уточнение моделей стационарного теплового режима проводников. Для этого авторами предлагается определять установившийся нагрев при помощи уравнения, включающего результаты измерений характеристик нагрева реального объекта. Точность и скорость расчета параметров стационарного теплового режима будет являться ключевой составляющей при мониторинге технического состояния воздушных линий, что может сыграть важную роль при поиске оптимального режима работы [8-11] и разработке программных комплексов по оптимизации [12-13].

### Зависимость установившегося нагрева от параметров окружающей среды

Для рассмотрения зависимости установившегося нагрева от параметров окружающей среды запишем уравнение теплового баланса в случае вынужденной конвекции [7]:

$$\Delta P_0(1 + \alpha\theta) = d_{np} \left[ \pi \alpha_{вын} (\theta - \theta_{окр}) + \pi \varepsilon_n C_0 (T^4 - T_{окр}^4) - A_s q_{солн} \right], \quad (1)$$

где  $\alpha_{вын}$  – коэффициент теплоотдачи вынужденной конвекцией, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>2</sup>);  $\varepsilon_n$  – коэффициент черноты поверхности провода для инфракрасного излучения;  $C_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) – постоянная излучения абсолютно черного тела;  $\theta$  и  $\theta_{окр}$  – температуры соответственно провода и окружающей среды, °С;  $T$  и  $T_{окр}$  – то же в К (абсолютные температуры);  $A_s$  – поглощательная способность поверхности провода для солнечного излучения;  $q_{солн}$  – плотность потока солнечной радиации на провод, Вт/м<sup>2</sup>;  $d_{np}$  – диаметр провода, м;  $\Delta P_0 = I^2 r_0$  – потери активной мощности в проводе на единицу длины при  $\theta = 0$  °С;  $I$  – ток в проводе, А;  $r_0$  – погонное активное сопротивление провода при  $\theta = 0$  °С, Ом/м;  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления.

Коэффициент теплоотдачи вынужденной конвекцией можно расписать согласно [7]:

$$\alpha_{вын} = 0,044 \frac{k_v (P_{атм} V)^{0,6}}{(T_{окр} d_{np})^{0,4}}, \quad (2)$$

где  $k_v$  – коэффициент угла атаки ветра;  $P_{атм}$  – атмосферное давление, Па;  $V$  – скорость ветра, м/с.

Установившийся нагрев проводника, согласно (1) и (2) изменяется в зависимости от таких параметров окружающей среды, как: температура окружающей среды, скорость ветра, атмосферное давление, коэффициента угла атаки ветра и интенсивность потока солнечного излучения. Остальные составляющие уравнения теплового баланса, то есть диаметр провода, погонное активное сопротивление, степень черноты поверхности провода и поглощательная способность поверхности провода для солнечного излучения зависят от кабеля, его цвета и материала из которого сделан. Поэтому удобнее производить вычисления по уравнению, в котором значение установившегося нагрева зависит только от параметров окружающей среды. Данное уравнение имеет следующий вид:

$$\theta = a \cdot \theta_{\text{окр}} + b \cdot q_{\text{солн}} + c \cdot k_V + d \cdot V + e \cdot P_{\text{атм}} + f, \quad (3)$$

где  $a, b, c, d, e, f$  – коэффициенты уравнения, которые зависят от тока нагрузки.

### Зависимость установившегося нагрева от параметров окружающей среды

Характер зависимости установившегося нагрева от каждого параметра был найден с помощью уравнения теплового баланса следующим образом:

1) По уравнению (1) найдены значения установившегося нагрева, при условии, что все составляющие уравнения неизменны, а изменяется только наблюдаемый параметр.

2) Построены зависимости установившегося нагрева от исследуемого параметра и подобраны полиномы, которые точнее всего описывают наблюдаемый параметр (рис. 1).

Исходя из рис. 1, можно сделать вывод, что установившееся значение нагрева имеет линейную зависимость от температуры окружающей среды, плотности потока солнечной радиации и атмосферного давления, а угол атаки ветра и скорость ветра имеют логарифмическую зависимость. Поэтому в уравнении (3) угол атаки ветра и скорость ветра следует ввести через натуральный логарифм:

$$\theta = a \cdot \theta_{\text{окр}} + b \cdot q_{\text{солн}} + c \cdot \ln k_V + d \cdot \ln V + e \cdot P_{\text{атм}} + f. \quad (4)$$

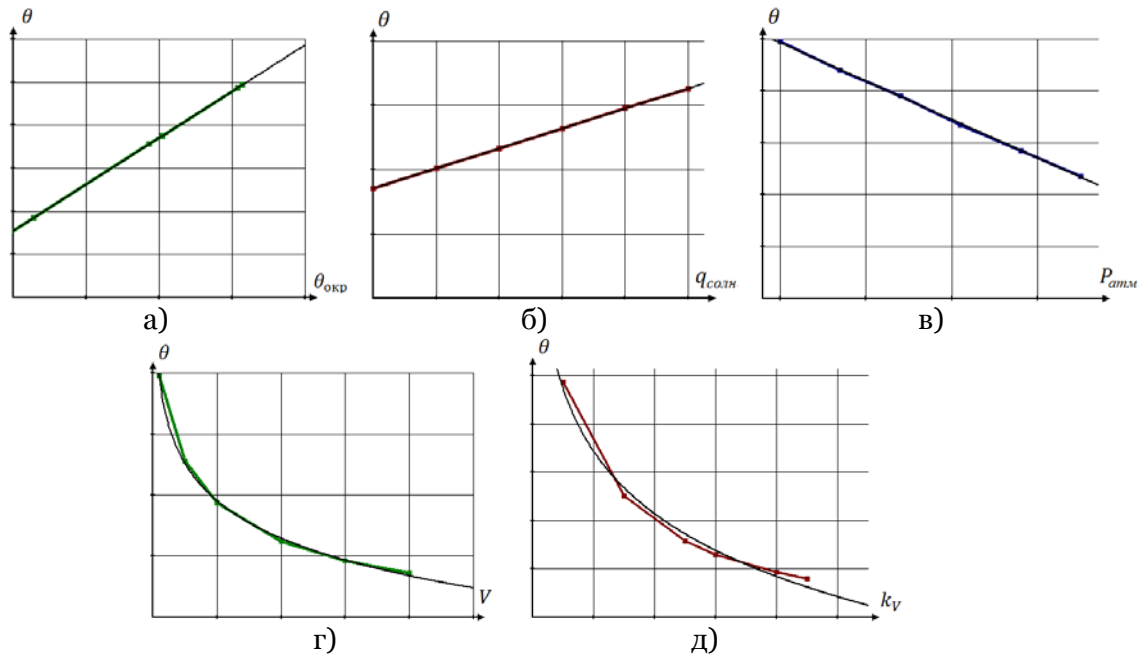


Рис. 1. Зависимости установившегося нагрева от параметров окружающей среды и их полиномы: а – от температуры окружающей среды; б – от плотности потока солнечной радиации; в – от угла атаки ветра; г – от атмосферного давления; д – от скорости ветра

### Алгоритм определения параметров модели стационарного теплового режима

1) Измеряем установившийся нагрев. Требуется провести 6 измерений установившегося нагрева для 4 нагрузочных токов. Рекомендуется проводить данные замеры в течение 6 различных дней, изменяя нагрузочный ток четыре раза и записывая средние параметры окружающей среды в этот день.

2) Определяем коэффициенты уравнения (4). Данные коэффициенты вычисляются с помощью нахождения определителя матрицы (5):

$$\begin{vmatrix} \theta_{окр} - \theta_{окр0} & \theta_{окр1} - \theta_{окр0} & \dots & \theta_{окр5} - \theta_{окр0} \\ \theta - \theta_0 & \theta_1 - \theta_0 & & \theta_5 - \theta_0 \\ q_{солн} - q_{солн0} & q_{солн1} - q_{солн0} & \ddots & q_{солн5} - q_{солн0} \\ k'_V - k'_{V0} & k'_{V1} - k'_{V0} & & k'_{V5} - k'_{V0} \\ V' - V_0 & V_1 - V_0 & & V_5 - V_0 \\ P_{атм} - P_{атм0} & P_{атм1} - P_{атм0} & \dots & P_{атм5} - P_{атм0} \end{vmatrix} = 0, \quad (5)$$

где  $k'_V = \ln k_V$ ;  $V' = \ln V$ ;  $\theta_{окрi}$ ,  $\theta_i$ ,  $q_{солнi}$ ,  $k'_{Vi}$ ,  $V'_i$ ,  $P_{атми}$  – результаты измерений.

3) Строим зависимости коэффициентов уравнения (4), найденных в пункте 2, от тока нагрузки и подбираем полиномы, которые точнее всего описывают данные зависимости.

### Анализ результатов

В качестве примера представим вычисление коэффициентов уравнения (4) для кабеля АС-240/32 и сравним с результатом вычисления по уравнению (1). Составляющие уравнения (1), которые принимаем считать неизменными (диаметр провода, погонное активное сопротивление, степень черноты поверхности провода и поглощательная способность поверхности провода для солнечного излучения), были взяты согласно табл. 1. В качестве данных используются решения уравнения (1). Результат расчета установившегося нагрева и параметры окружающей среды, при которых они были получены, представлены в табл. 2.

Таблица 1. Данные для решения уравнения теплового баланса, принятые неизменными

Наименование и обозначение параметра	Численное значение
Диаметр провода $d_{np}$	0,0216 м
Степень черноты поверхности провода $\varepsilon_n$	0,9
Поглощательная способность поверхности провода для солнечного излучения $A_s$	0,6
Погонное активное сопротивление $r_0$	0,0001114 Ом/м
Температурный коэффициент сопротивления $\alpha$	0,0043 1/°C

Для нагрузочного тока 600 А, подставив соответствующие коэффициенты в (5), получаем:

$$\theta = 1,0928 \cdot \theta_{окр} + 0,00803 \cdot q_{солн} - 31,0762 \cdot k'_V - 17,632 \cdot V' + 0,000126 \cdot P_{атм} + 11,527.$$

Таблица 2. Результаты решения уравнения (1), принятые за реальный эксперимент

Параметры окружающей среды	Значение параметра окружающей среды в опыте					
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6
Плотность потока солнечной радиации $q_{солн}$ , Вт/м <sup>2</sup>	380	750	670	800	730	661
Коэффициент угла атаки ветра $k_V$	0,5	0,6	0,75	0,75	0,65	0,65
$k'_V = \ln k_V$	-0,69	-0,51	-0,28	-0,28	-0,43	-0,43
Атмосферное давление $P_{атм}$ , Па	98645	98978	99685	99325	98965	98778
Скорость ветра $V$ , м/с	1,1	1,5	1,1	1,2	1	2,2
$V' = \ln V$	0,095	0,405	0,095	0,18	0	0,78

Температура окружающей среды $\theta_{окр}, ^\circ\text{C}$	11,6	13,3	14,7	19,6	22,9	30
Ток нагрузки, А	Значение установившегося нагрева, рассчитанного по уравнению (1) $\theta, ^\circ\text{C}$					
600	59,61	53,35	52,86	57,68	68,34	61,62
500	45,68	42,69	42,52	47,65	56,17	53,02
400	34,7	34,3	34,37	39,73	46,56	46,22
300	26,44	27,98	28,24	33,76	39,3	41,08

Результаты вычисления для остальных токов нагрузки представлены в табл. 3.

Таблица 3. Коэффициенты уравнения (4) для различных токов нагрузки

Ток нагрузки, А	Значения коэффициентов уравнения (4)					
	$a$	$b$	$c$	$d$	$e$	$f$
600	1,0928	0,00803	-31,076	-17,632	0,000126	11,527
500	1,0859	0,009	-24,369	-12,825	0,000695	-54,546
400	1,0795	0,00989	-19,234	-9,00168	0,001203	-112,785
300	1,0722	0,0104	-15,256	-6,111	0,001563	-154,225

Зависимости коэффициентов уравнения (4) от тока нагрузки представлены на рис. 2.

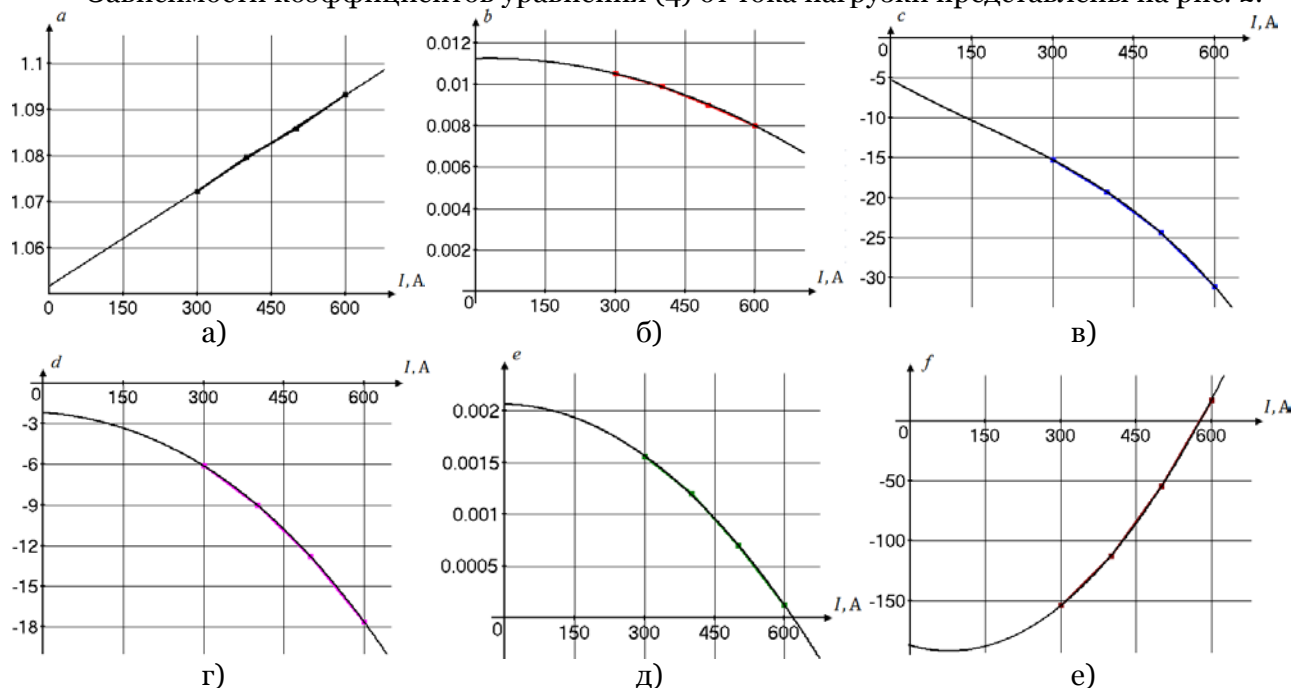


Рис. 2. Зависимости коэффициентов от тока нагрузки и их полиномы:  
а –  $a=f(I)$ ; б –  $b=f(I)$ ; в –  $c=f(I)$ ; г –  $d=f(I)$ ; д –  $e=f(I)$

Коэффициент  $a$  описывается полиномом первой степени;  $b, e$  и  $f$  – второй степени; коэффициенты  $c$  и  $d$  – третьей степени.

Адекватность данной модели проверим по критерию Фишера. Выборки, по которым будем судить об адекватности, представлены в табл. 4. В первой выборке находится результат расчета установившегося нагрева, вычисленного по уравнению (1), а во второй, вычисленного по уравнению (3).

Таблица 4. Сравнительная таблица

Параметры окружающей среды	Значение параметра окружающей среды в опыте						
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7
Плотность потока солнечной радиации $q_{солн}$ , Вт/м <sup>2</sup>	765	93	30	450	717	540	380
Коэффициент угла атаки ветра $k_v$	0,5	0,75	0,75	0,4	0,5	0,6	0,75
Атмосферное давление $P_{атм}$ , Па	98498	99125	97245	100658	100111	99271	100032
Скорость ветра $V$ , м/с	1,1	2,8	2,3	0,1	0,6	0,6	0,1
Температура окружающей среды $\theta_{окр}$ , °С	20,2	-3,2	-12,1	-2,4	18,9	17,2	11
Ток нагрузки, А	520	600	600	470	510	330	500
Значения установившегося нагрева, рассчитанного по уравнению (1) $\theta$ , °С	61,41	16,05	8,42	66,19	67,63	38,46	69,91
Значения установившегося нагрева, рассчитанного по уравнению (4) $\theta$ , °С	60,89	12,12	5,13	62,12	66,88	38,42	66,88

Значение  $F$  критерия получилось равным 1,042. Для уровня значимости  $q = 0,05$  и  $n - 1 = 6$   $F_{кр} = 4,28$ . Так как  $F_{кр} > F$ , то разработанная модель адекватна.

### Вывод

Данный подход позволяет на основании шести измерений установившегося нагрева для четырех нагрузочных токов построить линейную зависимость установившегося нагрева от параметров окружающей среды. Важно учесть, что для точности построения данной зависимости скорость ветра и угол атаки ветра должны меняться минимум в трех из шести опытов. Это связано с тем, что установившийся нагрев логарифмически зависит от данных параметров. От остальных параметры окружающей среды он зависит линейно, а, следовательно, они должны измениться минимум в двух из шести опытов.

Достоинствами данного подхода является, во-первых, то, что указанную зависимость можно вывести, не зная диаметра, погонного сопротивления, степени черноты поверхности и поглощающей способности поверхности линии электропередачи для солнечного излучения.

Во-вторых, вычисления по полученному линейному выражению достаточно просты, что позволяет избежать итерационного расчета, в отличие от решения уравнения теплового баланса.

И, в-третьих, предложенный подход основан на измерении температуры проводника, а не на расчете, тем самым погрешность в определении установившегося значения нагрева сводится к минимуму.

### Примечания:

1. Аналитическое решение уравнения теплового баланса провода воздушной линии в условиях вынужденной конвекции [Электронный ресурс] / Е.В. Петрова и др. // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1. Режим доступа: [www.science-education.ru/121-18506](http://www.science-education.ru/121-18506) (дата обращения: 30.05.2015).

2. Гиршин С.С., Горюнов В.Н., Бигун А.Я. Расчет нестационарных температурных режимов воздушных линий электропередачи с учетом нелинейности процессов теплообмена // Омский научный вестник. 2013. № 1. С. 1-8.

3. Баранов М.И., Носенко М.А. Приближенный метод расчета максимальной температуры нагрева металлического проводника импульсным током // *Электричество*. 2011. № 1. С. 36-44.
4. Моделирование стационарного нагрева изолированного проводника с учетом мощности источника теплоты и теплообмена с окружающей средой / А.С. Дмитриченко и др. // *Пожарная безопасность*. 2012. № 1. С. 67-73.
5. Кабышев А.В. *Электроснабжение объектов. Ч.1. Расчет электрических нагрузок, нагрев проводников и электрооборудования: учебное пособие*. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2007. 185 с.
6. Лившиц Д.С. *Нагрев проводников и защита предохранителями в электросетях до 1000 В.* – Москва: Государственное энергетическое изд-во, 1959. 39 с.
7. Упрощение уравнений теплового баланса воздушных линий электропередачи в задачах расчета потерь энергии / С.С. Гиршин и др. // *Омский научный вестник*. 2013. № 1. С. 148-151.
8. Beliaeva N., Petrochenkov A., Bade K. Data Set Analysis of Electric Power Consumption // *European Researcher*, 2013, Vol.(61), № 10-2, P. 2482-2487. available at: [http://www.erjournal.ru/journals\\_n/1383881713.pdf](http://www.erjournal.ru/journals_n/1383881713.pdf). DOI: 10.13187/issn.2219-8229.
9. Ромодин А.В., Лейзгольд Д.Ю. Модель системы ситуационного управления гибкими линиями электропередачи в нормальных режимах работы [Электронный ресурс] // *Современные проблемы науки и образования*. 2013. № 6. – Режим доступа: [http://elibrary.ru/full\\_text.asp?id=21162625](http://elibrary.ru/full_text.asp?id=21162625) (дата обращения: 21.05.2015)
10. Лейзгольд Д.Ю., Чудинов А.В. Оптимизация распределения потоков активной мощности в системе электроснабжения предприятий с учетом величины нагрева проводников // *Проблемы региональной энергетики*. 2015. № 1 (27). С. 35-42.
11. Разработка алгоритма расчета потерь в изолированных проводах воздушных линий с учетом режимных и климатических факторов / Е.В. Петрова и др. // *Омский научный вестник*. 2011. № 3. С. 221-225.
12. Петроченков А.Б., Ромодин А.В. Разработка подходов к построению комплекса «Энергооптимизатор» // *Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность*. 2013. № 4. С. 20-25.
13. Петроченков А.Б., Ромодин А.В. Комплекс «Энергооптимизатор» // *Электротехника*. 2010. № 6. С. 49.

### References:

1. Analiticheskoe reshenie uravneniya teplovogo balansa provoda vozduшной линии v usloviyakh vyzhdennoi konveksii, E.V. Petrova i dr., *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 2015, no. 1. Available at: [www.science-education.ru/121-18506](http://www.science-education.ru/121-18506) (accessed 30.05.2015).
2. Girshin S.S., Goryunov V.N., Bigun A.Ya. Raschet nestatsionarnykh temperaturnykh rezhimov vozduшной линии elektroperedachi s uchetom nelineinosti protsessov teploobmena, *Omskii nauchnyi vestnik*, 2013, no. 1, pp. 1-8.
3. Baranov M.I., Nosenko M.A. Priblizhennyi metod rascheta maksimal'noi temperatury nagreva metallicheskogo provodnika impul'snym tokom, *Elektrichestvo*, 2011, no. 1, pp. 36-44.
4. Modelirovanie statsionarnogo nagreva izolirovannogo provodnika s uchetom moshchnosti istochnika teploty i teploobmena s okruzhayushchei sredoi, A.S. Dmitrichenko i dr., *Pozharnaya bezopasnost'*, 2012, no. 1, pp. 67-73.
5. Kabyshev A.V. *Elektrosnabzhenie ob"ektov. Ch.1. Raschet elektricheskikh nagruzok, nagrev provodnikov i elektrooborudovaniya: uchebnoe posobie*, Izd-vo. Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2007, 185 p.
6. Livshits D.S. *Nagrev provodnikov i zashchita predokhranitelyami v elektrosetyakh do 1000 V*, Moskva: Gosudarstvennoe energeticheskoe izd-vo, 1959, 39 p.
7. Uproshchenie uravnenii teplovogo balansa vozduшной линии elektroperedachi v zadachakh rascheta poter' energii, S.S. Girshin i dr., *Omskii nauchnyi vestnik*, 2013, no.1, pp. 148-151.

8. Beliaeva N., Petrochenkov A., Bade K. Data Set Analysis of Electric Power Consumption / European Researcher, 2013, Vol.(61), № 10-2, P.2482-2487. available at: [http://www.erjournal.ru/journals\\_n/1383881713.pdf](http://www.erjournal.ru/journals_n/1383881713.pdf). DOI: 10.13187/issn.2219-8229.

9. Romodin A.V., Leizgol'd D.Yu. Model' sistemy situatsionnogo upravleniya gibkimi liniyami elektroperedachi v normal'nykh rezhimakh raboty, *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 2013, no. 6. Available at: [http://elibrary.ru/full\\_text.asp?id=21162625](http://elibrary.ru/full_text.asp?id=21162625) (accessed 21.05.2015)

10. Leizgol'd D.Yu., Chudinov A.V. Optimizatsiya raspredeleniya potokov aktivnoi moshchnosti v sisteme elektrosnabzheniya predpriyatii s uchetom velichiny nagreva provodnikov, *Problemy regional'noi energetiki*, 2015, no. 1 (27), pp. 35-42.

11. Razrabotka algoritma rascheta poter' v izolirovannykh provodakh vozdushnykh linii s uchetom rezhimnykh i klimaticheskikh faktorov, E.V. Petrova i dr., *Omskii nauchnyi vestnik*, 2011, no. 3, pp. 221-225.

12. Petrochenkov A.B., Romodin A.V. Razrabotka podkhodov k postroeniyu kompleksa «Energooptimizator», *Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost'*, 2013, no. 4, pp. 20-25.

13. Petrochenkov A.B., Romodin A.V. Kompleks «Energooptimizator», *Elektrotehnika*, 2010, no. 6, p. 49.

УДК 621.311.001.57+621.315

### **К разработке экспресс-методики определения параметров модели стационарного теплового режима воздушных линий электропередачи**

<sup>1</sup> Антон Борисович Петроченков

<sup>2</sup> Александр Вячеславович Ромодин

<sup>3</sup> Дмитрий Юрьевич Лейзгольд

<sup>4</sup> Михаил Сергеевич Борисов

<sup>1</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Российская Федерация

614990, Пермский край, г. Пермь, пр. Комсомольский, 29

Кандидат технических наук, доцент

E-mail: [pab@msa.pstu.ac.ru](mailto:pab@msa.pstu.ac.ru)

<sup>2</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Российская Федерация

614990, Пермский край, г. Пермь, пр. Комсомольский, 29

Кандидат технических наук, доцент

E-mail: [romodin@mail.ru](mailto:romodin@mail.ru)

<sup>3</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Российская Федерация

614990, Пермский край, г. Пермь, пр. Комсомольский, 29

Аспирант

E-mail: [dmleyz@mail.ru](mailto:dmleyz@mail.ru)

<sup>4</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Российская Федерация

614990, Пермский край, г. Пермь, пр. Комсомольский, 29

E-mail: [mihail.borisov.1993@mail.ru](mailto:mihail.borisov.1993@mail.ru)

**Аннотация.** В статье рассматривается вопрос определения величины установившегося нагрева воздушной линии под нагрузкой. Авторами предлагается определять величину установившегося нагрева на основании реальных экспериментальных данных. Для получения уравнения процесса нагрева были построены и проанализированы зависимости установившегося нагрева от каждого параметра окружающей среды. Кроме



того, приведен алгоритм, в котором указан порядок действий, с помощью которого можно составить уравнение для расчета установившегося нагрева. Оценка достоверности результатов, получаемых с помощью предлагаемой модели, была произведена по критерию Фишера, который показал, что разработанная модель адекватна ( $F$  меньше  $F_{кр}$  более чем в 4 раза). Предложенный подход может использоваться при разработке модели стационарного режима нагрева проводников достаточно высокой точности при небольших затратах времени на сбор необходимых данных.

**Ключевые слова:** вынужденная конвекция, установившийся нагрев, уравнение теплового баланса.