

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РЕЖИМА ЗАМКНУТОЙ ПИТАЮЩЕЙ СЕТИ С УЧЁТОМ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ АКТИВНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

В статье рассмотрена задача расчета режима электрической сети с двухсторонним питанием с учетом температурной зависимости активных сопротивлений. Целью статьи является анализ режимов электрической сети с учетом и без учета взаимного влияния электро-тепловых процессов. Совместное решение уравнений электрического и теплового режимов реализовано на основе коррекции температур при формировании матрицы Якоби на каждой итерации решения уравнений узловых напряжений. Учет температурной зависимости активных сопротивлений позволяет уточнить параметры режима электроэнергетической системы. На основании полученных результатов следует, что при учете тепловых процессов существенно уточняются токи, отклонения напряжения и потери мощности в сети. Наибольшая степень уточнения имеет место при расчете потерь активной мощности.

**Ключевые слова:** электрический режим, температурная зависимость, метод Ньютона, активное сопротивление.

**Введение.** Расчет и анализ установившихся режимов электроэнергетической системы необходим при проведении проектных работ, а также для уже находящихся в эксплуатации электрических сетей. Расчет установившихся режимов производится на основе решения уравнений узловых напряжений различными численными методами, которые подробно описаны в [1].

При расчете режимов электрических сетей традиционно используются различные вариации метода Ньютона (от классического до методов по параметру). Данный метод обладает рядом преимуществ. В первую очередь, это малое количество приближений, необходимое для определения искомым амплитуд и фаз напряжений с заданной точностью. Представленное преимущество обусловлено квадратичной сходимостью метода Ньютона. Как правило, в нормальном случае итерационный процесс сходится за 5–10 приближений.

Однако при введении в уравнения электрического режима дополнительных составляющих

происходит резкое ухудшение сходимости метода Ньютона. Дополнительной переменной, ухудшающей сходимость, является фактическая температура проводника. Необходимость учета реальной температуры провода линий электропередачи отмечается в работах [2–5].

Температурные режимы элементов электрической сети формируются под влиянием электромагнитных процессов. Вместе с тем электрический режим сети, представляющий собой совокупность электромагнитных процессов во всех ее элементах, испытывает обратное влияние со стороны температурных режимов. Механизм этого влияния обусловлен главным образом температурной зависимостью активных сопротивлений. Физически это проявляется в виде инерционной нелинейности сопротивлений: температура, от которой зависит значение активного сопротивления, в свою очередь, зависит от тока.

При расчете режимов электрических сетей данный вид нелинейности, как правило, не учитыва-

ется. Это связано, во-первых, со сложностью таких расчетов, а во-вторых, с тем, что напряжения и токи в сети сравнительно мало зависят от активных сопротивлений. Сеть является только «передаточным звеном», и сопротивления ее элементов значительно меньше, чем нагрузок; кроме того, в полных сопротивлениях воздушных линий и трансформаторов велика реактивная составляющая.

За рубежом совместный учёт уравнений электрического и теплового режимов используются для анализа перегрузочной способности линий и предела по передаваемой мощности от источников к потребителям [6–8]. Обычно расчет температуры линий электропередачи в иностранной литературе производится на основе стандарта IEEE 738-2012 (или более ранних версиях) [9].

Во время периодов, когда линия электропередачи находится в достаточно жестких условиях: температура окружающей среды достигает значительных величин, недостаточная скорость ветра для охлаждения проводника и высокие значения, протекающих токов в системе, важно оценить реальную температуру проводника для различных целей, таких как увеличение пропускной способности линии, избежание возможных проблем с провесом проводов, повышения точности расчета сопротивления проводника и, следовательно, потерь мощности.

В случае, когда линии электропередачи недогружены, т.е. протекающие токи далеки от допустимых по нагреву, влияние тепловых процессов на электрический режим будет слабым.

Совместный расчёт параметров электрического и теплового режимов представляет достаточно трудоёмкую задачу. Уравнения, описывающие тепловые процессы (уравнения теплового баланса — УТБ) значительно отличаются от уравнений узловых напряжений, поэтому при расчёте режима сети с учётом температуры будет возникать заметное ухудшение сходимости итерационного процесса.

Как показано в [10], при совместном решении уравнений электрического и тепловых режимов методом Ньютона количество итераций резко увеличивается по сравнению с расчётом электрического режима без тепловых процессов.

Значительно лучшей сходимостью обладает специальная модификация метода Ньютона, которую будем называть методом внутренней температурной коррекции. Эта модификация ориентирована только на рассматриваемую задачу и основана на условном разделении уравнений электрического и теплового режимов. При этом метод Ньютона применяется для уравнений электрического режима, а матрица Якоби на каждой итерации дополнительно уточняется на основе решения уравнений теплового баланса. Таким образом, каждая итерация метода Ньютона дополняется расчетом температур элементов сети и уточнением активных сопротивлений, которые затем вводятся в матрицу Якоби. Однако сама матрица Якоби включает в себя только производные по модулям и фазам напряжения, но не по температурам. Расчёт температуры линий электропередачи будем производить на основе решения уравнений теплового баланса методом Феррари, который подробно рассмотрен в работе [11]. Представленный метод является аналитическим, в отличие от численных методов, рассмотренных в работах [12–15].

**Теория.** Запишем уравнения узловых напряжений (УУН) в форме баланса активной и реактивной мощности в полярной системе координат [16]:

$$U_i^2 g_{ii} - U_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^k U_j \left( g_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) - b_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) \right) + P_i = 0. \quad (1)$$

$$U_i^2 b_{ii} - U_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^k U_j \left( b_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + g_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) \right) + Q_i = 0, \quad (2)$$

где  $U_i, \delta_i, U_j, \delta_j$  — модули и фазы напряжений в узлах, кВ и град;  $P_i, Q_i$  — мощности потребителей, МВт и Мвар;  $g_{ij}, b_{ij}$  — действительная и мнимая части собственной проводимости узла;  $g_{ij}, b_{ij}$  — действительная и мнимая части взаимной проводимости.

Нагрузку потребителей будем моделировать статическими характеристиками нагрузки (СХН) по напряжению. В представленной работе СХН аппроксимированы полиномами второй степени [17–18]. Такой способ задания нагрузок достаточно точно учитывает влияние напряжения на потребляемые мощности:

$$P_i = P_{n,i} \cdot (a_{2,i} \cdot k_i^2 + a_{1,i} \cdot k_i + a_{0,i}). \quad (3)$$

$$Q_i = Q_{n,i} \cdot (b_{2,i} \cdot k_i^2 + b_{1,i} \cdot k_i + b_{0,i}), \quad (4)$$

где  $a_{2,i}, a_{1,i}, a_{0,i}, b_{2,i}, b_{1,i}, b_{0,i}$  — коэффициенты квадратичной аппроксимации СХН, которые могут быть получены на основе различных методов, описанных в [17].

Задание нагрузок в виде пологих статических характеристик учитывает влияние напряжения на потребляемые мощности и в то же время достаточно близко к заданию нагрузок постоянной мощностью [19].

В выражениях (3), (4) коэффициент  $k_i$  определяется как

$$k_i = \frac{U}{U_{ном}}$$

где  $U$  — фактическое напряжение в узле.

Собственные проводимости вычисляются по следующей формуле:

$$Y_{ii} = G_i - jB_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^k (g_{ij} - jb_{ij}), \quad (5)$$

где  $G_i$  — активная проводимость  $i$ -го узла на землю;  $B_i$  — реактивная проводимость  $i$ -го узла на землю (индуктивная вводится со знаком "+", а емкостная — со знаком "-").

Знаки реактивной части взаимной проводимости определяются по тому же принципу, что и знаки для собственной проводимости.

Действительная и мнимая части собственной проводимости узла могут быть определены по следующим формулам:

$$g_{ii} = G_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^k g_{ij}. \quad (6)$$

$$b_{ii} = B_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^k b_{ij}. \quad (7)$$

**Математическая модель установившегося режима сети.** Рассмотрим одноконтурную электриче-

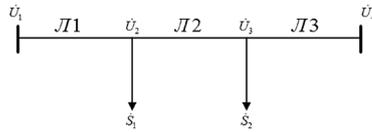


Рис. 1. Сеть с двухсторонним питанием

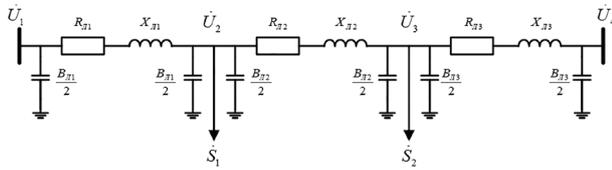


Рис. 2. Схема замещения линии с двухсторонним питанием

скую сеть с двухсторонним питанием. На рис. 1, 2 представлены общий вид и схема замещения замкнутой сети с тремя линиями (приведенная ниже математическая модель может быть легко обобщена на сеть той же конфигурации с произвольным числом линий). На основании теоретических выкладок, представленных выше, запишем уравнения узловых напряжений для этой сети. Система дополнена уравнениями теплового баланса линий электропередачи, решаемых аналитическим методом [11]. Связь уравнений узловых напряжений и уравнений теплового баланса задается выражениями температурной зависимости активных сопротивлений, которые также введены в общую систему уравнений:

$$P_{n,1}(a_2 \cdot k_1^2 + a_1 \cdot k_1 + a_0) + U_2^2 g_{22} - U_2 U_3 (g_{23} \cos(\delta_2 - \delta_3) - b_{23} \sin(\delta_2 - \delta_3)) - U_2 U_1 (g_{21} \cos(\delta_2 - \delta_1) - b_{21} \sin(\delta_2 - \delta_1)) = 0. \quad (8)$$

$$Q_{n,1}(b_2 \cdot k_1^2 + b_1 \cdot k_1 + b_0) + U_2^2 b_{22} - U_2 U_3 (b_{23} \cos(\delta_2 - \delta_3) + g_{23} \sin(\delta_2 - \delta_3)) - U_2 U_1 (b_{21} \cos(\delta_2 - \delta_1) + g_{21} \sin(\delta_2 - \delta_1)) = 0. \quad (9)$$

$$P_{n,2}(a_2 \cdot k_2^2 + a_1 \cdot k_2 + a_0) + U_3^2 g_{33} - U_3 U_2 (g_{32} \cos(\delta_3 - \delta_2) - b_{32} \sin(\delta_3 - \delta_2)) - U_3 U_4 (g_{34} \cos(\delta_3 - \delta_4) - b_{34} \sin(\delta_3 - \delta_4)) = 0. \quad (10)$$

$$Q_{n,2}(b_2 \cdot k_2^2 + b_1 \cdot k_2 + b_0) + U_3^2 b_{33} - U_3 U_2 (b_{32} \cos(\delta_3 - \delta_2) + g_{32} \sin(\delta_3 - \delta_2)) - U_3 U_4 (b_{34} \cos(\delta_3 - \delta_4) + g_{34} \sin(\delta_3 - \delta_4)) = 0. \quad (11)$$

$$\frac{1000}{3l_i n_{\psi,i} n_{\phi,i}} [U_i^2 + U_{i+1}^2 - 2U_i U_{i+1} \cos(\delta_i - \delta_{i+1})] \frac{R_i}{Z_i^2} - d_{np,i} [\pi \alpha_{\text{вын},i} (\Theta_i - \Theta_{\text{окр}}) + \pi \epsilon_n C_0 (T_i^4 - T_{\text{окр}}^4) - A_s q_{\text{солн},i}] = 0, \quad i = 1, 2, 3. \quad (12)$$

$$R_i = R_{0,i} (1 + \alpha \Theta_i), \quad i = 1, 2, 3. \quad (13)$$

$$Z_i^2 = R_i^2 + X_i^2, \quad i = 1, 2, 3. \quad (14)$$

$$Y_{i,i+1} = \frac{1}{R_{i,i+1} + jX_{i,i+1}} = \frac{R_{i,i+1} - jX_{i,i+1}}{R_{i,i+1}^2 + X_{i,i+1}^2} = g_{i,i+1} - jb_{i,i+1}, \quad i = 1, 2, 3, \quad (15)$$

Характеристика режимов, марки проводов и длины линий

№	Характеристика режима	Марки проводов, длины линий		
		Л1, 70 км	Л2, 30 км	Л3, 60 км
1	Однородная сеть с невысоким отношением сопротивлений X/R, большие нагрузки	АС-95	АС-95	АС-95
2	Однородная сеть с высоким X/R, большие нагрузки	АС-240	АС-240	АС-240
3	Неоднородная сеть, большие нагрузки	АС-240	АС-150	АС-150
4	Однородная сеть с невысоким X/R, небольшие нагрузки	АС-95	АС-95	АС-95
5	Однородная сеть с высоким X/R, большие нагрузки (режим перегрузок)	АС-240	АС-240	АС-240

Таблица 2

Активные и реактивные мощности нагрузок и напряжения источников питания

№	$P_{n,1}$ , МВт	$P_{n,2}$ , МВт	$Q_{n,1}$ , Мвар	$Q_{n,2}$ , Мвар	$U_1$ , кВ	$U_4$ , кВ
1	69	69	34	30	120	120
2	125	125	45	50	121	$120e^{\beta}$
3	110	85	65	45	$121e^{\beta}$	121
4	40	55	25	30	120	$115e^{\beta}$
5	145	145	50	55	121	$121e^{\beta}$

\*фаза напряжений измеряется в град.

Таблица 3

Коэффициенты статических характеристик нагрузок

$a_0$	$a_1$	$a_2$	$b_0$	$b_1$	$b_2$
0	0,4	0,6	9	-18	10

где  $l_i$  — длина линии, км;  $n_{\psi,i}$  и  $n_{\phi,i}$  — число цепей линии и число проводов в фазе;  $d_{np,i}$  — диаметр провода, м;  $\alpha_{\text{вын},i}$  — коэффициент теплоотдачи провода (вынужденной конвекцией), Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $\Theta_i$ ,  $\Theta_{\text{окр}}$  — температуры провода и окружающей среды, °C;  $T_i$ ,  $T_{\text{окр}}$  — абсолютные температуры провода и окружающей среды;  $\epsilon_n$  и  $A_s$  — степень черноты поверхности провода и поглощательная способность поверхности для солнечного излучения;  $C_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) — постоянная Стефана — Больцмана;  $q_{\text{солн},i}$  — плотность потока солнечной радиации на поверхность провода, Вт/м<sup>2</sup>;  $R_{0,i}$  — активное сопротивление линии, Ом, при 0 °C;  $\alpha$  — температурный коэффициент сопротивления.

Условия охлаждения и значения солнечной радиации

Параметр	Численное значение или расчетная формула
Температура окружающей среды $\Theta_{окр}$	- 10 °С
Атмосферное давление $P_{атм}$	101216 Па
Скорость ветра $V$	1 м/с
Коэффициент угла атаки ветра $k_v$ для линии 1–3	1
Плотность потока прямой солнечной радиации на поверхность, перпендикулярную солнечным лучам $q_{s,пр}$	500 Вт/м <sup>2</sup>
Плотность потока рассеянной солнечной радиации $q_{s,расс}$	100 Вт/м <sup>2</sup>
Коэффициент $k_{зм}$ , учитывающий затененность участков линий 1–3	0,7
Угол между осью провода и направлением солнечных лучей $\varphi_s$ для линии 1	$\pi/4$
Угол между осью провода и направлением солнечных лучей $\varphi_s$ для линий 2, 3	$\pi/5$
Коэффициенты теплоотдачи $\alpha_{вын}$	$\alpha_{вын} = 0,044 \frac{k_v (P_{атм} V)^{0,6}}{(T_{окр} d_{пр})^{0,4}}$
Плотности потока солнечной радиации на поверхности проводов $q_{солн}$	$q_{солн} = k_{зм} q_{s,пр} \sin \varphi_s + \pi q_{s,расс}$

Таблица 5

Расчетные параметры проводов

Параметр	АС-95/16	АС-150/24	АС-240/32
Диаметр провода $d_{пр}$	0,0135 м	0,0171 м	0,0216 м
Погонное активное сопротивление при 20°С $r_{20}$	0,306 Ом/км	0,204 Ом/км	0,118 Ом/км
Погонное индуктивное сопротивление $x_0$	0,429 Ом/км	0,414 Ом/км	0,405 Ом/км
Погонная емкостная проводимость $b_0$	2,641 мкСм/км	2,739 мкСм/км	2,808 мкСм/км
Температурный коэффициент сопротивления $\alpha$	0,0043 °С <sup>-1</sup>		
Степень черноты поверхности провода $\epsilon_n$	0,6		
Поглощательная способность поверхности провода для солнечного излучения $A_s$	0,6		
Допустимая температура провода $\Theta_{гон}$	70 °С		

**Результаты расчетов.** Для сравнения результатов расчета по методу 1, учитывающему температурную зависимость активных сопротивлений (метод внутренней температурной коррекции), и по методу 2, не учитывающему температуру

(классический метод, когда сопротивления элементов определяются по паспортным значениям), было рассмотрено 5 режимов (табл. 1, 2) электрической сети. Нагрузки в узлах с неизвестными напряжениями задаются полиномами второй степени с ко-

## Напряжения и токи

№ режима	№ метода	$\dot{U}_1$ , кВ	$\dot{U}_2$ , кВ	I, А			Кол-во итераций	
				Л1	Л2	Л3		
1	1	$95,29e^{-j5,98}$	$95,96e^{-j5,79}$	407,19	28,06	451,71	7	
	2	$97,73e^{-j6,34}$	$98,57e^{-j6,19}$	395,68	31,69	446,35	5	
2	1	$94,43e^{-j12,89}$	$94,19e^{-j11,69}$	695,53	90,59	842,34	7	
	2	$96,02e^{-j12,95}$	$96,03e^{-j11,79}$	681,42	88,34	834,47	5	
3	1	$93,06e^{-j8,29}$	$94,18e^{-j7,77}$	678,25	60	609,59	36	
	2	$94,99e^{-j8,49}$	$96,44e^{-j8,1}$	659,31	66	603	6	
4	1	$102,88e^{-j1,68}$	$101,3e^{-j0,87}$	289,97	80,62	321,38	5	
	2	$102,76e^{-j1,65}$	$101,12e^{-j0,88}$	288,28	78,32	321,48	5	
5	1	Метод внутренней температурной коррекции разошёлся						
	2	$89,73e^{-j15,88}$	$90,06e^{-j14,52}$	830,94	98,04	1012,18	9	

Таблица 7

## Температуры и потери мощности

№ режима	№ метода	Потери активной мощности, кВт				$\Theta$ , °С		
		Л1	Л2	Л3	сумма	Л1	Л2	Л3
1	1	11936	19	13320	25275	52,51	-5,3	69,01
	2	10061	28	10973	21060	-	-	-
2	1	12924	78	17804	30806	41,77	-4,05	68,03
	2	11506	83	14790	26379	-	-	-
3	1	12175	59	16375	28609	39,2	-4,54	72,8
	2	10771	80	13351	24202	-	-	-
4	1	5396	161	5837	11394	21,54	-3,63	28,51
	2	5340	169	5692	11201	-	-	-
5	1	Метод внутренней температурной коррекции разошёлся						
	2	17110	102	21760	38972	-	-	-

эффицентами, значения которых представлены в табл. 3 [18]. Будем считать, что коэффициенты статических характеристик по напряжению для узлов 2 и 3 одинаковы.

Параметры проводов, условия охлаждения и значения солнечной радиации представлены в табл. 4, 5.

В табл. 6, 7 представлены результаты расчета режимов, нумерация которых соответствует таблице 1.

Погрешности метода № 2 (не учитывающего температуру) относительно метода № 1 приведены в табл. 8. В представленной таблице режим № 5 не учитывается из-за того, что имело место расхождение итерационного процесса с учётом тепловых процессов в линиях электропередачи.

**Заключение.** На основе полученных результатов расчёта режима можно сделать следующие выводы:

1. При неучёте температурной зависимости активных сопротивлений возникают значительные погрешности в определении параметров режима. На основе результатов, представленных в табл. 8, можно сделать вывод о том, что наибольшая степень уточнения, обусловленная учётом температуры, имеет место при расчете потерь мощности (до 47,37 %). Также можно отметить, что максимальное значение погрешности определения отклонения напряжения без учёта тепловых процессов составляет 18,6 %. Фактические напряжения в узлах при этом оказываются ниже значений, полученных

Погрешности расчета режимов, обусловленные неучетом температуры (на основании таблиц 6 и 7)

Параметр	Отклонение напряжения в узле от номинального $U - U_{ном}$	Ток в линии $I$	Потери активной мощности в линии $\Delta P_A$	Суммарные потери активной мощности $\Delta P_{\Sigma}$
Средний модуль погрешности	9,75 %	3,1 %	15,76 %	12,04 %
Максимальная погрешность	- 18,6 %	11,5 %	47,37 %	16,68 %

без учета нагрева. Этот результат является важным с практической точки зрения, так как снижение напряжения в центрах питания может привести к ухудшению технологических процессов на промышленных предприятиях.

2. На основании табл. 1 и результатов, представленных в табл. 6, 7, можно сделать вывод о том, что расчет режима резко неоднородной сети с большими нагрузками обладает медленной сходимостью при учёте температурной зависимости сопротивлений. Также из результатов, представленных в табл. 6, следует вывод о значительном снижении напряжения в узлах сети при этих условиях. Данный факт свидетельствует о приближении режима к пределу по статической устойчивости. При расчете режима 5 (однородная сеть с высоким X/R, большие нагрузки (режим перегрузок)) наблюдается резкое ухудшение сходимости классического способа, не учитывающего температуру ЛЭП. При учете фактического нагрева проводников метод внутренней температурной коррекции разошёлся. Сходимость может быть улучшена на основе применения методов Ньютона с модификациями, таких как обобщённый метод Ньютона (метод по параметру) или методы, учитывающие вторые производные при разложении уравнений в ряд Тейлора.

#### Библиографический список

- Идельчик В. И. Электрические системы и сети. М.: Энергоатомиздат, 1989. 592 с. ISBN 5-283-01012-0.
- Гиршин С. С., Бубенчиков А. А., Петрова Е. В. [и др.]. Математическая модель расчета потерь мощности в изолированных проводах с учетом температуры // Омский научный вестник. 2009. № 3 (83). С. 176 – 179.
- Бурчевский В. А., Бубенчиков А. А., Горюнов В. Н. [и др.]. Коррекция технологических потерь электрической энергии ВЛ 35 кВ электрических сетей ООО «Роснефть-Юганскнефтегаз» на основе учета климатических и режимных условий // Омский научный вестник. 2010. № 1 (87). С. 127 – 132.
- Бигун А. Я., Гиршин С. С., Петрова Е. В. [и др.]. Учет температуры проводов повышенной пропускной способности при выборе мероприятий по снижению потерь энергии на примере компенсации реактивной мощности // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1-1. С. 212.
- Шведов Г. В., Азаров А. Н. Оценка влияния метеоусловий на годовые нагрузочные потери электроэнергии в проводах воздушных линий // Электричество. 2016. № 2. С. 11 – 18.
- Dong X., Wang Ch., Yun Zh. [et al.]. Calculation of optimal load margin based on improved continuation power flow model // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2018. Vol. 94. P. 225 – 233. DOI: 10.1016/j.ijepes.2017.07.004.
- Dong X., Wang Ch., Liang J. [et al.]. Calculation of Power Transfer Limit Considering Electro-Thermal Coupling

of Overhead Transmission Line // IEEE Transactions on Power Systems. 2014. Vol. 29, Issue 4. P. 1503 – 1511. DOI: 10.1109/TPWRS.2013.2296553.

8. Dong X., Kang Ch., Sun H. [et al.]. Analysis of power transfer limit considering thermal balance of overhead conductor // IET Generation, Transmission & Distribution. 2015. Vol. 9, Issue 14. P. 2007 – 2013. DOI: 10.1049/iet-gtd.2014.1113.

9. IEEE Std. 738-2012. (Revision of IEEE Std 738-2006 - Incorporates IEEE Std 738-2012 Cor 1-2013). Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors. Revision of IEEE Std 738-2006.

10. Гиршин С. С., Горюнов В. Н. Расчет установившегося режима замкнутой электрической сети с учетом нелинейности активных сопротивлений воздушных линий // Промышленная энергетика. 2015. № 3. С. 36 – 42.

11. Петрова Е. В., Гиршин С. С., Ляшков А. А. [и др.]. Аналитическое решение уравнения теплового баланса провода воздушной линии в условиях вынужденной конвекции // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1-1. С. 218.

12. Воротицкий В. Э., Туркина О. В. Оценка погрешностей расчета потерь электроэнергии в ВЛ из-за неучета метеоусловий // Электрические станции. 2008. № 10. С. 42 – 49.

13. Герасименко А. А., Тимофеев Г. С., Тихонович А. В. Учёт схемно-режимных и атмосферных факторов при расчёте технических потерь электроэнергии в распределительных сетях // Журнал Сибирского федерального университета. Сер. Техника и технологии. 2008. Т. 1, № 2. С. 188 – 206.

14. Зарудский Г. К., Шведов Г. В., Азаров А. Н. [и др.]. Оценка влияния метеорологических условий на активное сопротивление проводов воздушных линий электропередачи // Вестник МЭИ. 2014. № 3. С. 35 – 39.

15. Шепелев А. О., Гиршин С. С., Горюнов В. Н. [и др.]. Разработка алгоритма расчета потерь мощности в воздушных линиях электропередачи распределительных сетей с учетом режимных и климатических факторов // Омский научный вестник. 2017. № 3 (153). С. 78 – 81.

16. Гиршин С. С., Владимиров Л. В. Методы расчета и оптимизация режимов электроэнергетических систем: моногр. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010. 47 с.

17. Балдов С. В., Бушуева О. А., Кормилицын Д. Н. [и др.]. Определение статических характеристик нагрузки по напряжению в электрических сетях с комплексной нагрузкой // Вестник ИГЭУ. 2014. № 6. С. 22 – 30.

18. Konyukhova E. A. Choosing the power of capacitor banks in the electrical networks of industrial plants with taking into account voltage regimes // Электричество. 1998. № 1. С. 18 – 25.

19. Конохова Е. А. Электроснабжение объектов. М.: Мастерство, 2002. 320 с. ISBN 5-294-00063-6.

**ШЕПЕЛЕВ Александр Олегович**, аспирант, ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных

предприятий» Омского государственного технического университета (ОмГТУ).

SPIN-код: 8418-9944

AuthorID: 827023

**ГИРШИН Станислав Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ.

SPIN-код: 1125-1521

AuthorID: 297584

**ГОРЮНОВ Владимир Николаевич**, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ.

SPIN-код: 2765-2945

AuthorID: 302109

**СИДОРОВ Олег Алексеевич**, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Электроснабжение железнодорожного транспорта» Омского государственного университета путей сообщения.

SPIN-код: 2364-5676

AuthorID: 434966

**ХАЦЕВСКИЙ Константин Владимирович**, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Электрическая техника» ОмГТУ.

SPIN-код: 7219-6033

AuthorID: 465857

**ШЕПЕЛЕВА Елена Юрьевна**, аспирантка, ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ.

SPIN-код: 2198-3042

AuthorID: 821672

Адрес для переписки: alexshepelev93@gmail.com

#### Для цитирования

Шепелев А. О., Гиршин С. С., Горюнов В. Н. [и др.]. Математическое моделирование электрического режима замкнутой питающей сети с учётом температурной зависимости активных сопротивлений // Омский научный вестник. 2018. № 4 (160). С. 103–109. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-160-103-109.

Статья поступила в редакцию 20.03.2018 г.

© А. О. Шепелев, С. С. Гиршин, В. Н. Горюнов, О. А. Сидоров, К. В. Хацевский, Е. Ю. Шепелева