

# Алгоритмы расчета токораспределения в электрических сетях<sup>1</sup>

ВОЙТОВ О.Н., ПОПОВА Е.В., СЕМЕНОВА Л.В.

*Приводится описание алгоритма расчета токораспределения в электрической сети с учетом зависимости активного сопротивления неизолированного провода воздушной линии от протекающего по нему тока. Рассмотрены особенности программной реализации алгоритма. Приведены результаты алгоритма при решении различных задач, возникающих при эксплуатации электрических сетей. Показано, что учет рассматриваемой зависимости позволяет уточнить значения параметров режима, предельных перетоков и потерь активной мощности в электрической сети.*

**Ключевые слова:** электрическая сеть, токораспределение, воздушные линии, активное сопротивление провода, температура, расчет

Учет температуры провода  $T_{\text{пр}}$  воздушной линии (ВЛ) с неизолированным проводом при расчете потокораспределения позволяет повысить точность оценки состояния электрической сети (ЭС), значений предельных параметров режима и потерь активной мощности в ЭС. Точность определения температуры провода ВЛ зависит от полноты учета влияющих на нее факторов, таких как ток в проводе, температура воздуха, скорость и направление вектора, уровень солнечной радиации.

Способы учета факторов определяются характером допущений, связанных с неполнотой информации и сложностью описания процесса изменения температуры.

Наиболее существенными допущениями являются использование средней температуры провода, учет нормативных значений скорости ветра, солнечной радиации, типа погоды, влажности и давления воздуха.

Расчет температуры  $T_{\text{пр}}$  выполняется либо с использованием уравнения теплового баланса [1–9], учитывающего солнечную радиацию, потери мощности на лучеиспускание и конвекцию, либо по данным телеизмерений о токах и напряжениях по концам ВЛ [12], позволяющим определить полное сопротивление провода и его температуру.

В алгоритмах [13, 15, 16] учет температуры провода проводится непосредственно в процессе расчета потокораспределения в ЭС. Алгоритм [13, 15] использует регрессионные зависимости, аппроксими-

*An algorithm for calculating current distribution in an electric network is described that takes into account the dependence of the resistance of an overhead line's noninsulated wire on the current flowing through it. Specific features of the software implementation of the algorithm are considered. Results obtained from operation of the algorithm in solving various problems encountered during operation of electric networks are presented. It is shown that the operating parameters, limiting flows and active power losses in an electric network can be determined more exactly if the considered dependence is taken into account.*

**Key words:** electric network, current distribution, overhead lines, wire resistance, temperature, calculation

мирующие множество решений уравнений теплового баланса. Алгоритм [16] основан на аналитическом решении уравнения теплового баланса. В статье приводится анализ влияния загрузки ВЛ, распределенности параметров линий и солнечной радиации на погрешность определения средней температуры провода, описание модификаций алгоритма [16] и результатов его тестирования на расчетных схемах реальных ЭС.

**Описание ЭС.** Рассматривается расчетная схема ЭС, содержащая  $N$  узлов,  $N_{\text{тр}}$  трансформаторов,  $L$  линий, из которых  $N_{\text{вл}}$  выполнены неизолированным проводом. Используется П-образная схема замещения линий электропередачи. Состояние ЭС определяется вектором переменных режима  $Z_z$ , включающим комплексы узловых напряжений  $U_n$ ,  $n=1, N$ , и значения температуры проводов  $T_{\text{пр}m}$ ,  $m=1, N_{\text{вл}}$ .

Вектор условно-постоянных параметров ЭС  $Z_p$  содержит инъекции активной и реактивной мощности  $P_n + jQ_n$ ,  $n=1, N$ ; активные  $r_i$  и индуктивные  $x_i$  сопротивления, активные  $g_i$  и емкостные  $b_i$  проводимости линий,  $i=1, L-N_{\text{вл}}$ ; удельные сопротивления  $r_{0m}$ ,  $x_{0m}$  и проводимости  $g_{0m}$ ,  $b_{0m}$ , длину  $l_m$  и диаметры проводов  $d_m$  линий,  $m=1, N_{\text{вл}}$ .

Состояние окружающей среды описывается вектором  $Z_E$ , включающим температуру воздуха  $T_B$ , уровень солнечной радиации  $Q_r$ , вектор скорости ветра  $\bar{v}$ .

**Алгоритм решения уравнения теплового баланса провода ВЛ.** Уравнение теплового баланса неизолированного провода ВЛ представлено в [7], где приводится методика оценки температуры неизолиро-

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке ВНС Российской Федерации (грант 4633.2010.8) РФФИ (грант # 09-08-91330).

ванного провода для средних значений параметров внешней среды, таких как атмосферное давление, влажность и т.д. В соответствии с [7] уравнение теплового баланса линии  $i$ - $j$  имеет вид

$$w_T = I_{ij}^2 r_0(T_{\text{пр}}) = (W_L + W_K)DT - Q_r, \quad (1)$$

где  $I_{ij}$  — фазный ток, А;  $r_0(T_{\text{пр}})$  — удельное активное сопротивление провода при температуре  $T_{\text{пр}}$ , Ом/м;  $W_L, W_K$  — коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием и конвекцией, Вт/(м $\times$ С);  $DT = T_{\text{пр}} - T_B$ , °С;  $Q_r$  — мощность солнечной радиации, Вт/м.

Значение параметров, входящих в (1), находятся из выражений:

$$W_L = 7,24 \times 10^{-6} \frac{\alpha(T_{\text{пр}} + T_B)}{2} + 273 \frac{\beta}{1000}; \quad (2)$$

$$W_K = \begin{cases} 0,16d^{0,75}DT^{0,3} & \text{для } v < 1,2; \\ 1,1\sqrt{vd} & \text{для } v \geq 1,2 \text{ и } (\bar{l}_d \bar{v}) = 0; \\ 0,55\sqrt{vd} & \text{для } v \geq 1,2 \text{ и } (\bar{l}_d \bar{v}) = v; \end{cases} \quad (3)$$

$$Q_r = 100bqd; \quad (4)$$

$$r_0 = r_{20}[1 + a(T_{\text{пр}} - 20)]; \quad (5)$$

$$I_{ij} = U_{ij} / (L_{ij} \sqrt{r_0^2 + x_0^2}), \quad (6)$$

где  $d$  — диаметр провода, см;  $v$  — модуль вектора скорости ветра  $\bar{v}$ , м/с;  $\bar{l}_d$  — нормированный вектор направления провода;  $b=0,6$  — коэффициент поглощения, принятый равным коэффициенту лучеиспускания;  $q$  — суммарная месячная солнечная радиация по данным наблюдений метеорологических станций, которая в соответствии с [7] принимается равной в летний период  $0,07$  В/см $^2$ , а в зимний — нулю;  $r_{20}, x_0$  — удельные активное при  $T_{\text{пр}} = 20^\circ\text{C}$  и реактивное сопротивления провода, Ом/м;  $L_{ij}$  — длина провода, м;  $U_{ij}$  — модуль падения напряжения в линии, равный модулю разности комплексных узловых напряжений  $|\dot{U}_i - \dot{U}_j|$ , кВ.

После подстановки в уравнение (1) выражений (2)—(6) и его преобразования в уравнение теплового баланса провода по переменной  $DT$  получим: многочлен  $w_T^{(1)}$  при скорости ветра  $v < 1,2$

$$w_T^{(1)}(DT) = a_6 DT^6 + a_5 DT^5 + a_4 DT^4 + a_{33} DT^{3,3} + a_3 DT^3 + a_{23} DT^{2,3} + a_2 DT^2 + a_{13} DT^{1,3} +$$

$$+ a_1 DT + a_0 = 0 \quad (7)$$

и многочлен  $w_T^{(2)}$  при скорости ветра  $v \geq 1,2$

$$w_T^{(2)}(DT) = a_6 DT^6 + a_5 DT^5 + a_4 DT^4 + a_{30} DT^3 + a_{20} DT^2 + a_{10} DT + a_0 = 0, \quad (8)$$

где  $a_6 = a$ ;  $a_5 = a(3b + 2c)$ ;  $a_4 = a(3b^2 + 6bc + c^2 + x_{\text{пр}}^2 / f)$ ;  $a_{33} = m$ ;  $a_3 = a(b^3 + 6b^2c + 3bc^2 + 3bx_{\text{пр}}^2 / f)$ ;  $a_{30} = (6ab^2c + 3abc^2 + g + 3abx_{\text{пр}}^2 / f)$ ;  $a_2 = p + 2ab^3c + 3ab^2c^2 + 3ab^2x_{\text{пр}}^2 / f$ ;  $a_{20} = p + 2cg + 3ab^2c^2 + 3ab^2x_{\text{пр}}^2 / f$ ;  $a_{13} = m(c^2 + x_{\text{пр}}^2 / f)$ ;  $a_{23} = 2cm$ ;  $a_{10} = (2cp + ab^3c^2 + ab^3x_{\text{пр}}^2 / f - nU_{ij}^2 / f)$ ;  $a_0 = (c^2p + px_{\text{пр}}^2 / f - cnU_{ij}^2 / f)$ ;  $x_{\text{пр}} = L_{ij}x_0$ ;  $a = 0,543 \times 10^{-9}d$ ;  $b = 2T_B + 546$ ;  $c = T_B + 230$ ;  $f = 0,48 \times 10^{-4}r_0^2L_{ij}^2$ ;  $g = b^3 + 1,1\sqrt{vd} / a$ ;  $m = 0,16d^{0,75} / a$ ;  $n = 0,004r_0$ ;  $p = 60qd / a$ .

Анализ многочленов (7) и (8), проведенный д.ф.-м.н. О.В. Хамисовым, показал, что коэффициенты многочлена (7) и первая производная от функции  $w_T^{(1)}$  положительны при  $DT^3 > 0$ ; это свойство гарантирует сходимость метода Ньютона при любом исходном приближении  $DT > 0$  с шагом, равным единице;

все коэффициенты многочлена (8), кроме  $a_0$  и  $a_{10}$ , больше нуля, откуда следует, что функция  $w_T^{(2)}$  не является монотонно возрастающей при  $DT^3 > 0$ ; при выборе в качестве исходного приближения значения  $DT$ , равного  $|a_{10} / (2a_{20})|$ , находящегося на монотонно возрастающем участке функции, обеспечивается сходимость метода Ньютона.

Для поиска корней многочленов использовался итеративный алгоритм метода Ньютона, в котором начальное исходное приближение для  $DT$  выбиралось в соответствии с изложенными рекомендациями. Исходное приближение переменной  $DT^p$  на каждой итерации  $p$  вычислялось как

$$DT^{p+1} = DT^p - \frac{w_T^{(s)}(DT^p)}{dw_T^{(s)}(DT^p) / dDT}, \quad s = 1, 2. \quad (9)$$

Критерием завершения работы алгоритма является выполнение условия  $|w_T^{(s)}(DT^p)| < x$ , где  $x$  — заданное малое положительное число.

В результате работы алгоритма определяется температура провода  $T_{\text{пр}} = T_{\text{в}} + DT^P$ .

В [16] для поиска корней многочленов (7) и (8) авторами использовалась стандартная процедура [18], основанная на методе Мюллера, которая требовала тщательной настройки для различных расчетных ситуаций. Предлагаемый алгоритм не требует дополнительных настроек и обладает высокой надежностью получения решения.

В точке решения для значений  $U_i, U_j, T_{\text{пр}}$ , при которых  $w_T^{(s)}(DT) = 0$ , многочлен (7) или (8) можно представить в виде неявной функции

$$w_T^{(s)}(T_{\text{пр}}, U_i, U_j) = 0, \quad s = 1, 2, \quad (10)$$

на основе которой можно получить коэффициенты линейной аппроксимации для  $T_{\text{пр}}(U_i, U_j)$ :

$$\frac{\partial T_{\text{пр}}}{\partial U_i} = - \frac{\frac{\partial w_T^{(s)}}{\partial T_{\text{пр}}} \frac{\partial T_{\text{пр}}}{\partial U_i}}{\frac{\partial w_T^{(s)}}{\partial T_{\text{пр}}}} \quad (11)$$

$$\frac{\partial T_{\text{пр}}}{\partial U_j} = - \frac{\frac{\partial w_T^{(s)}}{\partial T_{\text{пр}}} \frac{\partial T_{\text{пр}}}{\partial U_j}}{\frac{\partial w_T^{(s)}}{\partial T_{\text{пр}}}}$$

Производные (11) используются далее при вычислении элементов матрицы Якоби.

**Алгоритм расчета токораспределения в ЭС с учетом уравнения теплового баланса провода.** Токораспределение в ЭС с учетом температуры провода может быть получено в результате решения систем нелинейных уравнений:

балансов активных и реактивных узловых мощностей [17]

$$w_{Pn}(Z_Z, Z_P, Z_E) = 0, \quad n = 1, N, \quad (12)$$

$$w_{Qn}(Z_Z, Z_P, Z_E) = 0$$

где  $w_{Pn}, w_{Qn}$  — функции узловых небалансов активной и реактивной мощности,

и тепловых балансов проводов линий

$$w_{Tn}(Z_Z, Z_P, Z_E) = 0, \quad m = 1, N_{\text{вл}}. \quad (13)$$

Для решения (12) и (13) используется алгоритм метода Ньютона—Рафсона с деформацией шага [17], в котором при формировании элементов матрицы Якоби учитывается зависимость активного сопротивления линии от тока  $r_{\text{пр}}(I_{\text{пр}})$ . Для работы алгоритма требуется задание значений компонент вектора параметров внешней среды  $Z_E$ .

Алгоритм содержит следующие этапы (исходное значение индекса итерации  $k$  равно нулю).

1. Выбор исходного приближения для компонент вектора  $Z_Z^k$ .

2. Расчет температуры провода  $T_{\text{пр}m}^k$  для линии  $m, m = 1, N_{\text{вл}}$ , с учетом уравнения теплового баланса (13) и удельного сопротивления  $r_{0m}^k(T_{\text{пр}m}^k)$  по выражению (5).

3. Расчет значений функций узловых небалансов активной мощности  $w_{Pn}(Z_Z^k, Z_P^k, Z_E)$  и реактивной  $w_{Qn}(Z_Z^k, Z_P^k, Z_E)$ ,  $n = 1, N$ . Формирование вектора небалансов мощности  $W(Z_Z^k)$ . Выход из расчета, если максимальное по модулю значение компоненты вектора небалансов мощности меньше или равно заданной точности, иначе — переход к следующему пункту.

4. Вычисление для системы (12) элементов матрицы Якоби  $\partial W(Z_Z^k) / \partial Z_Z$  с учетом выражений (11). Производные от перетоков активной  $P_m$  и реактивной  $Q_m$  мощностей в линии  $m, m = 1, N_{\text{вл}}$ , определяются как

$$\frac{\partial P_m}{\partial z_m} = \frac{\partial P_m}{\partial T_{\text{пр}m}} \frac{\partial T_{\text{пр}m}}{\partial z_m}, \quad (14)$$

$$\frac{\partial Q_m}{\partial z_m} = \frac{\partial P_m}{\partial T_{\text{пр}m}} \frac{\partial T_{\text{пр}m}}{\partial z_m}, \quad (15)$$

где  $z_m$  — вектор модулей и фаз комплексных узловых напряжений узлов линии  $m$ .

Получение производных от перетоков для остальных линий производится на основе общепринятых выражений, приведенных, например, в [10].

5. Определение вектора поправки  $DZ_Z^k$  из решения линейной системы уравнений, полученной при линеаризации уравнений (12) в точке  $Z_Z^k$ :

$$DZ_Z^k = - \frac{\frac{\partial W(Z_Z^k)}{\partial Z_Z} \frac{\partial Z_Z^k}{\partial Z_Z}}{\frac{\partial W(Z_Z^k)}{\partial Z_Z}} W(Z_Z^k). \quad (16)$$

6. Определение шага  $t_k$  и внесение поправки к вектору  $Z_Z^k$ :

$$Z_Z^{k+1} = Z_Z^k + t_k DZ_Z^k, \quad (17)$$

$k = k + 1$  и переход к п. 2 алгоритма.

**Тестирование алгоритма.** Далее для различных задач и расчетных схем реальных ЭС приводятся результаты сопоставительных расчетов токораспределения, полученных с учетом и без учета зависимости  $r_{\text{пр}}(I_{\text{пр}})$  активного сопротивления неизолированного провода ВЛ от протекающего по нему тока. Если зависимость  $r_{\text{пр}}(I_{\text{пр}})$  не учитывалась, то

температура провода  $T_{\text{пр}}$  принималась равной температуре воздуха  $T_{\text{в}}$ .

Для расчета токораспределения использовалось программное средство (ПС) СДО-7 [14], в котором реализован рассмотренный алгоритм. Тестирование выполнялось на компьютере с процессором Intel(R)/Core(TM)/i5CPU/3.2 GHz.

Далее используются обозначения  $p(I_{\text{пр}})$  и  $p$ , которые указывают, что значение параметра  $p$  получено с учетом и без учета зависимости  $r_{\text{пр}}(I_{\text{пр}})$ .

**Расчет токораспределения.** Расчеты проводились для схем ряда реальных ЭС, параметры которых приведены в табл. 1, содержащей результаты расчета.

Анализ данных, приведенных в табл. 1, показывает, что учет зависимости  $r_{\text{пр}}(I_{\text{пр}})$  приводит:

к увеличению потерь  $DP(T_{\text{пр}})$  для всех рассмотренных ЭС;

к существенному увеличению потерь  $DP(T_{\text{пр}})$  для ЭС, имеющих сильно загруженные и перегруженные ВЛ, например № 3, для которой  $T_{\text{пр max}} = 99,5$  °С. Признаком перегрузки является условие  $T_{\text{пр}} > T_{\text{пр. доп}}$ , где  $T_{\text{пр. доп}}$  — предельно допустимая температура провода, которая не должна превышать 70 °С [7];

к незначительному увеличению числа итераций, необходимых для расчета токораспределения, и к существенному повышению длительности выполнения одной итерации алгоритма расчета токораспределения без учета времени на подготовку данных.

**Расчет потерь электроэнергии для месяца.** Для оценки влияния учета зависимости  $r_{\text{пр}}(I_{\text{пр}})$  на значение потерь электроэнергии (ЭЭ) за расчетный период, равный месяцу, использовались данные реальных энергосистем, с уровнями напряжений 500—0,4 кВ. Расчеты проводились с учетом переключений элементов в ЭС за рассматриваемый месяц — коммутации реакторов, линий, трансформаторов, изменения положения отпаяк трансформаторов, а также графиков значений напряжений источников питания. Число переключений равно  $N_{\text{ком}}$ . В соответствии с алгоритмом, приведенным в [19], расчетный период времени разбивался на  $N_{\text{инт}}$  интервалов, в пределах которых состав элементов и напряжение источников питания оставались неизменными. Расчет токораспределения проводился для каждого интервала. Результаты расчетов приведены в табл. 2, анализ которых показывает, что учет зависимости  $r_{\text{пр}}(I_{\text{пр}})$  приводит:

к увеличению потерь ЭЭ;

к уменьшению отношения  $B_{\text{S}}^{\text{пот}}(T_{\text{пр}})/B_{\text{S}}^{\text{пот}}$ , которое становится на порядок меньше отношения

$B_{\text{S}}^{\text{пр}}(T_{\text{пр}})/B_{\text{S}}^{\text{пр}}$  (табл. 1), что связано с дополнительными затратами времени на подготовку информации.

**Расчет предельных или утяжеленных режимов.**

Для получения предельных режимов использовалась общепринятая методика, основанная на последовательном изменении значений мощностей генерации и нагрузки [17], которое обеспечивает увеличение перетока активной мощности по заданной линии или сечению. На каждом шаге изменения или утяжеления проводился расчет либо без учета ограничений — неравенств при расчете токораспределения (ПР), либо с их учетом и расчетом допустимого режима (ДР). Критерием завершения решения задачи утяжеления в первом случае является отсутствие решения системы уравнений (12). При расчете допустимого режима завершение возможно либо по условию существования решения системы (12), либо при отсутствии допустимого решения в точке решения.

Результаты сопоставительных расчетов (для 1-й схемы — расчет токораспределения, для 2-й — расчет допустимого режима):

Параметр	Схема ЭС	
	1-я	2-я
Число узлов	14	14
линий	14	14
трансформаторов	5	5
линий с неизолированными проводами	14	14
Суммарное потребление $P_{\text{НС}}$ , МВт	2100	2100
Температура, °С		
воздуха	20	20
средняя проводов	64	36
максимальная из проводов в предельном режиме	139	63
Предельный шаг утяжеления $t_{\text{ут}}(T_{\text{пр}})/t_{\text{ут}}$	12,6/14,7	6,11/6,19

Анализ этих данных показывает, что учет зависимости  $r_{\text{пр}}(I_{\text{пр}})$  при утяжелении режима без включения ограничений — неравенств при расчете токораспределения приводит:

к заметному уменьшению суммарного шага утяжеления  $t_{\text{ут}}(T_{\text{пр}})$  по сравнению с шагом  $t_{\text{ут}}$ ;

к увеличению средней температуры проводов  $T_{\text{ср}}$  и появлению перегруженных линий, о чем свидетельствует значение максимальной температуры провода  $T_{\text{max}}$ .

Кроме того, учет зависимости  $r_{\text{пр}}(I_{\text{пр}})$  с включением ограничений — неравенств при расчете токораспределения — дает незначительное отличие шагов ( $t_{\text{ут}}(T_{\text{пр}})$  и  $t_{\text{ут}}$ ). Это связано с завершением процесса решения задачи утяжеления по условию отсутствия допустимого режима в точке решения.

Таблица 1

Номер п/п (ЭС)	Число узлов, линий, трансформаторов $N/L/N_{тр}$	Число линий с неизолированными проводами $N_{вд}$	Температура воздуха $T_{в}$ , °С	Суммарная активная нагрузка $P_{н}$ , кВт	Уровни напряжений $U_{эс}$ , кВ	Максимальная температура провода, $T_{прmax}$ , °С	Значения потерь $DP(T_{пр})/DP$ , (%)*	Число итераций $n_{ит}(T_{пр})/n_{ит}$	Длительность расчета поточкораспределения $B_S^{пот}(T_{пр})/B_S$ , с
1-я	14/14/5	14	20	2100000	500—110	61,9	69300/63300(10,1%)	3/5	—
2-я	687/499/271	151	20	711700	220—10	38	11600/11400(1,8%)	6/6	0,11/0,05
3-я	907/571/374	162	20	1287	500—10	99,5	52,3/42,6(22,8%)	7/5	0,129/0,0273
4-я	5969/3904/1843	2821	25	107895	10—6	62,9	5414/5331(1,5%)	4/3	0,668/0,0898
5-я	7426/7320/0	967	20	328	0,4	63	0,077/0,066(17%)	4/3	0,93/0,07

\*Значения в скобках (%) получены при расчете по выражению  $(DP(T_{пр}) - DP)/DP$ .

Таблица 2

Номер п/п (ЭС)	Число			Суммарное потребление электроэнергии $\Sigma P_{нс}$ , кВт	Отношение потерь электроэнергий к суммарному потреблению $DP/EP_{нс}$ , %	Значение потерь энергии $DP(T_{пр})/DЭP$ , (%)	Длительность расчета потерь, с	
	узлов, линий трансформаторов $N/L/N_{тр}$	линий с неизолированными проводами $N_{вд}$	переключений $N_{ком}$				интервалов $N_{инт}$	на итерации $B_{ит}(T_{пр})/B_{ит}$
1-я	516/354/216	143	39	143942876	5,4	10734/104396 (2,9%)	0,18/0,03	3,0/0,48
2-я	675/492/264	242	247	5320412731	1,5	11144/10926, (2%)	0,11/0,04	10,8/4,9
3-я	906/571/374	348	232	75894145	5,9	82055/60644, (35,3%)	0,19/0,08	21,1/8,9

Примечание. Температура воздуха принималась 20 °С.

В этом случае значения параметров режима в исходной точке и точке решения достаточно близки друг к другу. Об этом также свидетельствует, во-первых, значение температуры  $T_{\max}$ , полученной при учете ограничений, которая не превышает предельно допустимой температуры  $T_{\text{пр.доп}}$ , и, во-вторых, температура  $T_{\text{ср}}$ , которая существенно меньше температуры, полученной при расчете без учета ограничений – неравенств.

**Расчет оптимальных режимов.** Сопоставительные расчеты были проведены для двух расчетных схем ЭС: 1-я тестовая и 2-я схема реальной ЭС, содержащая только 24% общего числа линий, для которых имеется информация для расчета температуры провода. Для каждой ЭС определялось токораспределение, имеющее минимальные потери активной мощности в ЭС. Результаты расчетов:

Параметр	Схема ЭС	
	1-я	2-я
Число узлов	14	915
линий	14	720
трансформаторов	5	541
линий с неизолированными проводами	14	171
Температура, °С		
воздуха	20	20
средняя проводов	34,2	30,6
максимальная одного из проводов в предельном режиме	62,8	30,6
Суммарное потребление $P_{\text{НС}}$ , МВт	2100	23600
Оптимальные потери $\frac{DP_{\text{опт}}(T_{\text{пр}})/DP_{\text{опт}}}{(\%)}$ , МВт/МВт	$\frac{69,6/68,1}{(1,6)}$	$\frac{246,6/245,7}{(0,4)}$

Анализ этих данных показывает, что для рассмотренных схем учет зависимости  $r_{\text{пр}}(I_{\text{пр}})$  приводит:

к возрастанию значения оптимальных потерь  $DP_{\text{опт}}(T_{\text{пр}})$  по сравнению с потерями  $DP_{\text{опт}}$ ;

к возрастанию значения  $DP_{\text{опт}}(T_{\text{пр}})/DP_{\text{опт}}$  при увеличении загрузки линий, характеризуемой средней температурой проводов  $T_{\text{ср}}$ .

**Влияние распределенности параметров ВЛ на точность определения температуры  $T_{\text{пр}}$ .** Расчеты проводились для ЭС, содержащей линию с одной нагрузкой. Параметры ВЛ (марка провода, длина линии,  $U_{\text{НОМ}}$ ): АС-185/24, 160 км, 110 кВ; АС-240/32, 200 км, 220 кВ; АСУ-400/92, 200 км, 500 кВ. Для моделирования распределенности параметров исходная линия разбивалась на участки одинаковой длины. Каждый участок моделировался П-образной схемой замещения, параметры которого рассчитывались в соответствии с его длиной. Расчеты проводились для двух значений уровня солнечной радиации  $q$  при температуре  $T_{\text{в}} = 25$  °С, скорости ветра  $\bar{v} = 1,2$  м/с, направленного перпендикулярно проводу.

Результаты расчетов для ВЛ, выполненной проводом АС-185/24, приведены в табл. 3. В табл. 3 параметры  $\tilde{T}_{\text{пр.ср}}$ ,  $\tilde{D}P$  и  $\tilde{I}_{\text{ср}}$  — относительные отклонения соответствующих величин от средних значений, полученных при разбивке ВЛ на 16 участков.

Анализ данных, приведенных в табл. 3, показывает, что учет распределенности параметров ВЛ приводит к уменьшению средней температуры  $T_{\text{пр}}$  и потерь активной мощности в ВЛ, что обусловле-

Таблица 3

Число участков	Среднее значение параметров ВЛ					
	Температура		Потери мощности		Ток участков линии	
	$T_{\text{пр.ср}}$ , °С	$\tilde{T}_{\text{пр.ср}}$ , %	$DP$ , МВт	$\tilde{D}P$ , %	$I_{\text{ср}}$ , А	$\tilde{I}_{\text{ср}}$ , %
Уровень солнечной радиации $q = 0$						
1	52,4	2,40	15,0	3,87	42,00	1,79
2	51,4	0,45	14,57	0,90	414,50	0,45
4	51,2	0,06	14,46	0,17	412,75	0,03
8	51,19	0,04	14,44	0,03	412,75	0,03
12	51,17	0	14,44	0	412,63	0
Уровень солнечной радиации $q = 0,07$ Вт/см						
1	60,20	1,86	16,09	4,32	—	—
2	59,35	0,42	15,58	1,04	—	—
4	59,18	0,14	15,47	0,28	—	—
8	59,10	0	15,42	0,02	—	—
16	59,10	0	15,42	0	—	—

но емкостной проводимостью линий на границах участков.

Аналогичные результаты были получены при расчете ВЛ, выполненных проводами АС-240/32 и АСУ-400/93.

**Расчет стрелы провеса провода.** Важным параметром ВЛ является стрела провеса провода  $f$ , значение которой для известной температуры провода  $T_{пр}$  определяется по [20]:

$$f = \frac{gL_{\Pi}^2}{8s}, \tag{18}$$

где  $L_{\Pi}$  — длина пролета, м;  $g$  — удельная нагрузка провода, Па/м;  $s$  — напряжение провода в низшей точке провеса, Па.

Выражение (18) получено при условии, что высота подвеса провода на опорах одинакова.

Для определения значения  $s$  для температуры  $T_{пр}$  и известного значения удельной нагрузки провода  $g$  требуется решить следующее уравнение состояния провода:

$$s - \frac{Eg^2 L_{\Pi}^2}{24s^2 l_s} = s_s - \frac{Eg_s^2 L_{\Pi}^2}{24s_s^2 l_s} - a_l E(T_{пр} - T_{прs}), \tag{19}$$

где  $E$  — модуль упругости провода, Па;  $l_s$  — длина провода в пролете:

$$l_s = L_{\Pi} + \frac{8f_s^2}{3L_{\Pi}}; \tag{20}$$

$s_s$  — напряжение в низшей точке провеса провода, Па;  $g_s$  — удельная нагрузка провода, Па/м;  $a_l$  — температурный коэффициент линейного расширения материала провода,  $1/^\circ\text{C}$ .

В (19) для расчетной ситуации принято, что температура  $T_{прs} = -40^\circ\text{C}$ , напряжение провода  $s_s$  равно предельно допустимому значению [20] и удельная нагрузка провода  $g_s$  известна.

В [3, 6] для получения решения уравнения (19) используются итерационные методы. Поскольку это уравнение является кубическим относительно неизвестного  $s$ , для его решения можно использовать формулы Кардано [11]. Анализ значений коэффициентов уравнения (19) показал, что его дискриминант при всех сочетаниях заданных параметров положителен. В этом случае существует вещественный и положительный корень уравнения, который принимается в качестве решения.

В задаче расчета допустимого режима (ОДР) [17] для учета ограничений — неравенств, накладываемых на изменение стрелы провеса проводов, необходимо определить функциональную зависимость  $f_m(Z_Z)$ , связывающую параметры режима  $Z_Z$  и стрелу провеса  $f_m, m=1, N_{вл}$ . Для этого необходимо дополнительно задать длину пролета,

удельную нагрузку, предельно допустимое напряжение, модуль упругости и коэффициент линейного расширения провода.

При решении задачи ОДР на каждой итерации зависимость  $f_m(Z_Z)$  линеаризуется. Коэффициенты этой зависимости получаются при вычислении производной в точке  $Z_Z$  для текущей температуры  $T_{пр}$  как

$$\frac{\partial f_m}{\partial z_m} = \frac{\partial f_m}{\partial T_{пр}} \frac{\partial T_{пр}}{\partial z_m}. \tag{21}$$

В (21) производная  $\partial T_{пр} / \partial z_m$  вычисляется в соответствии с (11), а производная  $\partial f_m / \partial T_{пр}$  с учетом (18) и (19) определяется как

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_m}{\partial T_{пр}} &= \frac{A_1}{s^2} \frac{1}{3s^2 - 2(A_2 + A_3(T_{пр} - T_{прs}))s} (-A_3 s^2) = \\ &= - \frac{A_1 A_3}{3s^2 - 2(A_2 + A_3(T_{пр} - T_{прs}))s}, \end{aligned} \tag{22}$$

где  $A_1 = \frac{gL_{\Pi}^2}{8}$ ;  $A_2 = s_s - \frac{Eg_s^2 L_{\Pi}^2}{24s_s^2 l_s}$ ;  $A_3 = -a_l E$ .

Для оценки влияния температуры провода  $T_{пр}$  на значения стрелы провеса и длины провода в пролете была рассмотрена ВЛ, выполненная проводом марки АС-150/19 при длине пролета  $L_{\Pi}$ , равной 300 м. Для расчета ситуации  $s$  принято отсутствие ветра и гололеда, равенство температуры воздуха и провода  $T_{пр} = T_{в} = -40^\circ\text{C}$ . Рассчитанные для  $s$ -й ситуации стрела провеса  $f_s$  и длина провода  $l_s$  в пролете равны 1,39 и 300,017 м соответственно.

Решая уравнения (19) для различных значений температуры провода  $T_{пр}$  с использованием (18), (20) и (22), получим значения стрелы провеса  $f$ , длины провода в пролете  $l$  и производной  $\partial f / \partial T_{пр}$ . Результаты расчетов, представленные в табл. 4, показывают, что размер стрелы провеса провода изменяется значительно.

Таблица 4

Температура провода $T_{пр}, ^\circ\text{C}$	Значения геометрических параметров ВЛ		
	$Df = f - f_s, \text{ см}$	$Dl = l - l_s, \text{ см}$	$f \varphi = \partial f / \partial T_{пр}, \text{ см}/^\circ\text{C}$
-40	0	0	4,16
-30	8	0,20	3,38
-10	27	0,73	2,63
10	51	1,49	1,89
30	82	2,62	1,58
50	122	4,34	1,46
70	174	6,97	1,42

Возможность расчета значения стрелы провеса провода линии с учетом изменения параметров режима и параметров внешней среды может оказаться полезной при анализе различных расчетных ситуаций и уточнении значений параметров схемы замещения ВЛ.

**Выводы.** 1. Разработанный алгоритм расчета токораспределения в ЭС позволяет решать задачи определения и минимизации потерь активной мощности в ЭС и задачи расчета утяжеленных режимов для расчетных схем реальных ЭС различной размерности.

2. Учет зависимости  $r_{\text{пр}}(I_{\text{пр}})$  позволяет повысить точность определения значений параметров режима и потерь активной мощности в ЭС, а учет распределенности параметров ВЛ приводит к дополнительному уточнению потерь активной мощности в ВЛ.

3. Для реализации этого алгоритма требуется незначительная доработка существующих программных средств расчета потокораспределения, в которых используется система уравнений баланса узловых мощностей, а также включение небольшого числа дополнительных параметров ВЛ и параметров внешней среды.

4. Трудоемкость решения рассмотренных задач с учетом времени, требуемого на подготовку и обработку информации, возрастает незначительно.

5. Приведенные соотношения для учета ограничений — неравенств на изменение стрелы провеса проводов, используются при решении задачи расчета допустимого режима ЭС.

Для дальнейшего повышения точности описания зависимости  $r_{\text{пр}}(I_{\text{пр}})$  требуется переход от нормативных параметров уравнения теплового баланса провода к значениям, вычисляемым по текущему состоянию окружающей среды.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаров Е.Ф. Справочник по электрическим сетям 0,4–36 кВ, т. 1/Под ред. И.Т. Горюнова и др. — М.: Папирус Про, 1999.
2. Воротницкий В.Э., Туркина О.В. Оценка погрешностей расчета переменных потерь электроэнергии в ВЛ из-за неучета метеоусловий. — Электрические станции, 2008, № 10.
3. Никифоров Е.П. Предельно допустимые токовые нагрузки на провода действующих ВЛ с учетом нагрева проводов солнечной радиацией. — Электрические станции, 2006, № 7.
4. Железко Ю.С. Методы расчета нормативов технологических потерь электроэнергии в электрических сетях. — Электричество, 2006, № 12.
5. Герасименко А.А., Шульгин И.В. Уточнение технических потерь электроэнергии в воздушных линиях распределительных сетей. — Сб. докл. III Междунар. научн.-практич. конф. «Энер-

госистема: управление, конкуренция, образование», т. 2. — Екатеринбург: УГТУ — УПИ, 2008.

6. Левченко И.И., Сацук Е.И. Нагрузочная способность и мониторинг воздушных линий электропередачи в экстремальных погодных условиях. — Электричество, 2008, № 4.

7. Методика расчета предельных токовых нагрузок по условиям нагрева проводов для действующих линий электропередачи. — М.: Союзтехэнерго, 1987.

8. Мельников Н.А. Электрические сети и системы. — М.: Энергия, 1969.

9. Бургсдорф В.В., Никитина Л.Г. Определение допустимых токов нагрузки воздушных линий электропередачи по нагреву их проводов. — Электричество, 1989, № 11.

10. Аюев Б.И., Давыдов В.В., Ерохин П.М., Неуймин В.Г. Вычислительные модели потокораспределения в электрических системах. — М.: Флинт, Наука, 2008.

11. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. — М.: Наука, 1980.

12. Бабник Т., Макхолец Б., Перко М. Распределенная система мониторинга режимов электроэнергетических систем: опыт применения. — Электричество, 2011, № 4.

13. Войтов О.Н., Попова Е.В. Алгоритм учета температуры проводов при расчете потокораспределения в электрической сети. — Электричество, 2010, № 9.

14. Программное средство (ПС СДО-7) для анализа, оптимизации установившихся режимов и оценки потерь электроэнергии в электрических сетях, версия 1. — Госстандарт России (Сертификат соответствия № РОСС RU.СП20.0001.11 СП20, срок действия с 31.01.2009 по 31.01.2012).

15. Попова Е.В. Алгоритм определения температуры провода с учетом солнечной радиации. — Сб. «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики». — Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2011, вып. 61.

16. Войтов О.Н., Семенова Л.В., Попова Е.В. Расчет потокораспределения в электрической сети с учетом уравнения теплового баланса проводов воздушных линий. — Сб. «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики». — Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2011, вып. 62.

17. Мурашко Н.А., Охорзин Ю.А., Крумм Л.А. и др. Анализ и управление установившимися состояниями электроэнергетических систем. — Новосибирск: Наука, 1987.

18. Бартевьев О.В. Фортран для профессионалов. Математическая библиотека IVSL, ч. 2. — М.: Диалог-Мифи, 2001.

19. Войтов О.Н., Семенова Л.В., Челпанов А.В. Алгоритм оценки потерь электроэнергии в электрической сети и их программная реализация. — Электричество, 2005, № 10.

20. Рябков А.Я. Электрические сети и системы. — М.: ГЭИ, 1960.

[24.07.12]

*Авторы: Войтов Олег Николаевич окончил электроэнергетический факультет Московского энергетического института в 1971 г. В 1992 г. защитил кандидатскую диссертацию «Алгоритмы управления режимами электроэнергетической системы». Ведущий научный сотрудник ИСЭМ СО РАН.*

*Попова Екатерина Валерьевна окончила энергетический факультет Иркутского политехнического института (ИрПИ) в 1989 г. Инженер ИСЭМ СО РАН.*

*Семенова Людмила Васильевна окончила энергетический факультет ИрПИ в 1974 г. Научный сотрудник ИСЭМ СО РАН.*