

РАСЧЕТ РЕЖИМА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ С ДВУХСТОРОННИМ ПИТАНИЕМ С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЙ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ

Бигун А.Я., Гиршин С.С., Кириченко Н.В., Птицына Е.В., Горчаков С.В.

ФГБОУ ВПО «Омский государственный технический университет», Омск, Россия (644050, г. Омск, пр. Мира, 11), e-mail: barsbigun@list.ru

Предложены математические модели установившегося режима электрической сети с двухсторонним питанием, включающие уравнения узловых напряжений сети и уравнения теплового баланса линий. Рассмотрены три возможных алгоритма численного решения уравнений режима, основанных на методе Ньютона и различающихся способами уточнения температуры. Показано, что прямое решение всей системы уравнений методом Ньютона малоэффективно из-за низкой сходимости, а наилучшими характеристиками обладает метод, основанный на коррекции температур, осуществляемой на каждой итерации решения уравнений узловых напряжений. Учет температурной зависимости сопротивления позволяет существенно уточнить токи, отклонения напряжения и потери мощности в сети. При этом уточнение потерь мощности может быть больше 40 %, что обусловлено как уточнением активных сопротивлений, так и учетом изменения токов под влиянием температур.

Ключевые слова: температура, линия электропередачи, электрическая сеть, потери энергии.

CALCULATION OF THE MODE ELECTRIC NETWORK WITH TWO-WAY POWER WITH THE TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE RESISTANCE OF THE AIR LINES

Bigun A.Y., Girshin S.S., Kirichenko N.V., Ptitsyna E.V., Gorchakov S.V.

Omsk State Technical University, Omsk, Russia (644050, Omsk, street Mira, 11), e-mail: barsbigun@list.ru

The mathematical model of the steady-state electric grid with two-way power, including the equation network node voltages and heat balance equation lines. Considered three possible algorithm of numerical solution of the mode based on the Newton method and different ways verifying temperature. It is shown that a direct solution of the whole system of equations by Newton's method is ineffective because of the low convergence, and has the highest performance method based on the temperature correction is performed at each iteration of the solution of the equations node voltages. Account the temperature dependence of the resistance can significantly clarify currents, voltage deviation and power losses in the network. In this specification the power loss may be greater than 40 %, due to a specification of active resistance, and taking into account the change in current under the influence of temperature.

Keywords: Temperature, power line, electric network, the energy loss.

Расчет установившихся режимов является одной из главных задач, решаемых при проектировании и эксплуатации электрических сетей. Стандартные математические модели учитывают нелинейность, вносимую потребителями энергии, однако параметры схемы замещения электрической сети обычно задаются в линейной форме. Вместе с тем для этих параметров также характерны различные виды нелинейности, среди которых наиболее важное значение имеет температурная зависимость активных сопротивлений продольных ветвей.

В настоящее время основной областью учета данного фактора в электроэнергетике является расчет потерь энергии. Однако температурная зависимость сопротивления учитывается обычно только на стадии вычисления потерь как функции токов или

передаваемых мощностей; сами токи и мощности в большинстве случаев определяются без учета температуры. Данное положение обусловлено тем, что если нагрузочные потери прямо пропорциональны активным сопротивлениям, то для токов и мощностей активные сопротивления элементов сети являются менее значимым фактором, часто рассматриваемым как вторичный. Действительно, схемы замещения электрических сетей содержат не только активные, но и индуктивные сопротивления, причем последние во многих случаях преобладают. Кроме того, если сеть разомкнута, то потокораспределение вообще мало зависит от параметров элементов сети и определяется в основном нагрузками.

Тем не менее функциональные связи между параметрами режима электрических систем имеют сложный и нелинейный характер, и предсказать степень влияния отдельных факторов на результаты расчета в каждой конкретной ситуации достаточно трудно. Поэтому разработки в области учета температурной зависимости сопротивлений при расчете режимов существуют [9, 2, 5-7].

В настоящей статье также предлагается один из вариантов решения данной задачи. Определение температуры производится на основе уточненных уравнений теплового баланса воздушных линий, учитывающих солнечную радиацию. При этом в качестве объекта расчетов выбрана сеть с двухсторонним питанием. Данный выбор обусловлен тем, что в замкнутых сетях, в отличие от разомкнутых, сопротивления элементов оказывают принципиальное влияние на потокораспределение. Кроме того, при изменении активных сопротивлений меняется степень однородности сети, что должно непосредственно сказываться на величине потерь энергии.

1. Математические модели. Сеть с двухсторонним питанием и ее схема замещения показаны на рис. 1, 2. Математическая модель установившегося режима, учитывающая температурную зависимость сопротивлений, может быть записана в следующем виде:

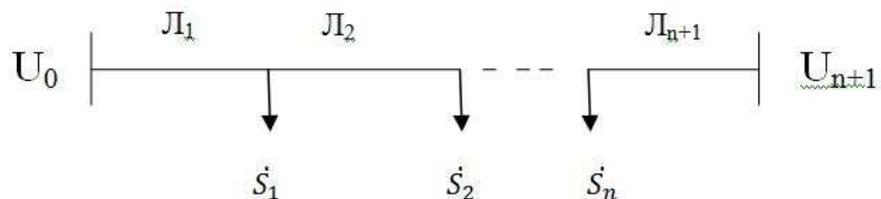


Рис . 1. Сеть с двухсторонним питанием

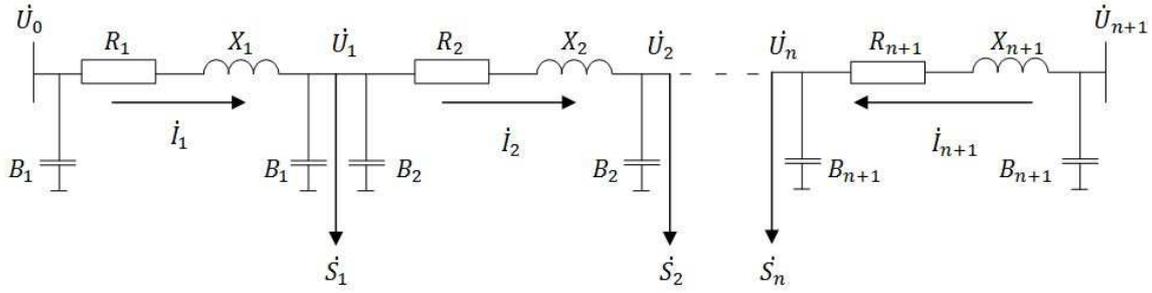


Рис. 2. Схема замещения

$$\left\{ \begin{aligned}
 & U_i \left[\frac{R_i}{Z_i^2} + \frac{R_{i+1}}{Z_{i+1}^2} \right] - \frac{U_{i-1}}{Z_i^2} [R_i \cos(\delta_i - \delta_{i-1}) - X_i \sin(\delta_i - \delta_{i-1})] - \\
 & - \frac{U_{i+1}}{Z_{i+1}^2} [R_{i+1} \cos(\delta_i - \delta_{i+1}) - X_{i+1} \sin(\delta_i - \delta_{i+1})] + \\
 & + P_{n,i} \left(\frac{a_{2,i} U_i}{U_{ном}^2} + \frac{a_{1,i}}{U_{ном}} + \frac{a_{0,i}}{U_i} \right) = 0, \quad i = 1 \dots n,
 \end{aligned} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{aligned}
 & U_i \left[\frac{X_i}{Z_i^2} + \frac{X_{i+1}}{Z_{i+1}^2} - B_i - B_{i+1} \right] - \frac{U_{i-1}}{Z_i^2} [X_i \cos(\delta_i - \delta_{i-1}) + R_i \sin(\delta_i - \delta_{i-1})] - \\
 & - \frac{U_{i+1}}{Z_{i+1}^2} [X_{i+1} \cos(\delta_i - \delta_{i+1}) + R_{i+1} \sin(\delta_i - \delta_{i+1})] + \\
 & + Q_{n,i} \left(\frac{b_{2,i} U_i}{U_{ном}^2} + \frac{b_{1,i}}{U_{ном}} + \frac{b_{0,i}}{U_i} \right) = 0, \quad i = 1 \dots n,
 \end{aligned} \right. \quad (2)$$

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

$$R_i = R_{0,i} (1 + \alpha \Theta_i), \quad i = 1 \dots n+1, \quad (4)$$

$$Z_i^2 = R_i^2 + X_i^2, \quad i = 1 \dots n+1, \quad (5)$$

где U_i , δ_i – модули и фазы напряжений в узлах, кВ и рад; $P_{n,i}$, $Q_{n,i}$ – мощности потребителей, МВт и Мвар, при условии, что напряжение в соответствующем узле равно $U_{ном}$, кВ; $a_{2,i}$, $a_{1,i}$, $a_{0,i}$, $b_{2,i}$, $b_{1,i}$, $b_{0,i}$ – коэффициенты квадратичной аппроксимации статических характеристик активной и реактивной мощности нагрузок по напряжению; l_i – длина линии, км; $n_{u,i}$ и $n_{\phi,i}$ – число цепей линии и число проводов в фазе; $d_{np,i}$ – диаметр провода, м; $\alpha_{вын,i}$ – коэффициент теплоотдачи провода (вынужденной конвекцией), Вт/(м²·°C); Θ_i , $\Theta_{окр}$ – температуры провода и окружающей среды, °C; T_i , $T_{окр}$ – абсолютные температуры провода и окружающей среды; ε_n и A_s – степень черноты поверхности провода и поглощательная способность поверхности для солнечного излучения; $C_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – постоянная Стефана – Больцмана; $q_{солн,i}$ – плотность потока солнечной радиации на поверхность провода, Вт/м²; $R_{0,i}$ – активное сопротивление линии, Ом, при 0 °C; α – температурный коэффициент сопротивления.

Уравнения (1), (2) представляют собой стандартные уравнения узловых напряжений в форме баланса токов в полярной системе координат. Собственные и взаимные проводимости узлов расписаны через сопротивления и емкостные проводимости линий. Это сделано для того, чтобы в уравнения в явном виде входили нелинейные элементы – активные сопротивления.

Кроме уравнений электрического режима (1), (2) система включает в себя уравнения теплового баланса воздушных линий (3). Первое слагаемое в этих уравнениях представляет собой потери активной мощности в одном проводе длиной 1 м, выраженные в [Вт]. Для перевода потерь во всей линии в [МВт] в указанную величину используется множитель перед квадратной скобкой. Выражение в квадратных скобках в рассматриваемом слагаемом представляет собой квадрат модуля падения напряжения в линии. Второе слагаемое определяет тепловой поток от провода, обусловленный конвекцией и тепловым излучением, за вычетом солнечной радиации, записанный аналогично [9].

Выражения (4) и (5) представляют собой формулы связи уравнений электрического и теплового режимов, определяющие температурную зависимость активных сопротивлений (4) и квадраты полных сопротивлений (5). Эти формулы выписаны отдельно только для наглядности и сокращения записи основных уравнений; в действительности при решении системы формулы (4), (5) подставляются в уравнения (1), (2) и (3). При этом общая размерность системы становится равной $(3n+1)$, и неизвестными в ней являются модули и фазы напряжений U_i , δ_i , а также температуры проводов Θ_i .

Особенностью и недостатком данной модели является множественность решений. Так, каждое из уравнений теплового баланса имеет по меньшей мере два действительных решения, и столько же решений обычно имеет нелинейная система уравнений электрического режима (при заданных сопротивлениях). Тогда общее число решений можно оценить как $2(n+1)^2$, причем только два из них имеют физический смысл, а остальные являются чистой математической абстракцией. Чтобы избежать этого, можно использовать упрощенную форму записи уравнений теплового баланса [9], которая исключает «посторонние» решения:

$$\Theta_i = \Theta_{окр} + \frac{\sqrt{A_{1,i}^2 - 4A_{0,i}A_{2,i}} - A_{1,i}}{2A_{2,i}}, \quad (6)$$

где

$$A_{2,i} = 6\pi d_{np,i} \varepsilon_n C_0 \left(\frac{2}{7} \Delta\Theta_\delta^2 + T_{окр} \Delta\Theta_\delta + T_{окр}^2 \right), \quad (7)$$

$$A_{1,i} = \pi d_{np,i} \left[\alpha_{вын,i} + 4 \varepsilon_n C_0 \left(T_{окр}^3 - \frac{8}{35} \Delta \Theta_\delta^3 - \frac{3}{5} T_{окр} \Delta \Theta_\delta^2 \right) \right] - \alpha \Delta P_{0,i}, \quad (8)$$

$$A_{0,i} = \frac{\pi d_{np,i} \varepsilon_n C_0 \Delta \Theta_\delta^3}{5} \left(\frac{3}{7} \Delta \Theta_\delta + T_{окр} \right) - d_{np,i} A_s q_{солн,i} - \Delta P_{0,i} (1 + \alpha \Theta_{окр}). \quad (9)$$

Здесь $\Delta \Theta_\delta = \Theta_{доп} - \Theta_{окр}$ – превышение допустимой температуры провода над температурой окружающей среды; $\Delta P_{0,i}$ – потери мощности в проводе длиной 1 м, которые имели бы место при фактическом токе и при температуре провода 0 °С [9]. Выражая эти потери через модули и фазы напряжений, получим:

$$\Delta P_{0,i} = \frac{1000}{3l_i n_{ц,i} n_{ф,i}} \left[U_i^2 + U_{i-1}^2 - 2U_i U_{i-1} \cos(\delta_i - \delta_{i-1}) \right] \frac{R_{0,i}}{Z_i^2}. \quad (10)$$

Заменив уравнение (3) на (6) с учетом (7)-(10), получим математическую модель режима, число решений в которой уменьшено до двух (если система уравнений узловых напряжений при постоянных сопротивлениях имеет 2 решения). При этом оба решения имеют физический смысл.

2. Выбор методов решения систем уравнений. При расчете режимов электрических сетей наиболее часто используется метод Ньютона. Естественным решением было бы непосредственное применение этого же метода для модели, учитывающей температуру, например (1)-(5). Однако уравнения теплового баланса резко отличаются от уравнений узловых напряжений, в результате чего можно ожидать ухудшения сходимости вычислительного процесса. В частности, если токи далеки от допустимых по нагреву, то влияние температуры на электрический режим будет слабым, что приведет к плохой обусловленности матрицы Якоби (в той части, которая соответствует уравнениям теплового баланса и производным по температуре).

Чтобы избежать этого, в основу алгоритма можно положить решение методом Ньютона только уравнений узловых напряжений, а влияние температуры учитывать как дополнительный уточняющий фактор. При этом возможны два подхода.

1. Организация двойного итерационного процесса: внутренний цикл – решение уравнений узловых напряжений; внешний цикл – уточнение температуры. Подобного рода алгоритмы описаны в работах к.т.н., доцента Барскова В.В.
2. Уточнение температуры на каждой итерации метода Ньютона при очередном расчете элементов матрицы Якоби. Другими словами, температурная коррекция вводится «внутри» метода Ньютона.

Общее описание и характеристики рассматриваемых методов сведены в (табл. 1).

Численные методы расчета режима сети с учетом температуры

Название метода	Совместное решение уравнений	Двойной итерационный процесс	Внутренняя температурная коррекция
Краткое описание	Уравнения узловых напряжений и теплового баланса решаются как единая система методом Ньютона.	1. Задание начальных приближений температур. 2. Расчет активных сопротивлений. 3. Решение уравнений узловых напряжений методом Ньютона. 4. Расчет следующих приближений температур и возврат в пункт 2.	На каждой итерации решения уравнений узловых напряжений методом Ньютона производится уточнение температур и активных сопротивлений путем решения уравнений теплового баланса. При этом элементы матрицы Якоби и правые части линеаризованных уравнений узловых напряжений вычисляются с учетом изменения активных сопротивлений.
Порядок матрицы Якоби	$3n+1$	$2n$	$2n$

Каждый из этих методов в принципе может быть использован как для модели без упрощений (1)-(5), так и для модели с квадратичной аппроксимацией (1), (2), (4)-(10). Однако совместное решение методом Ньютона уравнений (1), (2), (4)-(10) вместо (1)-(5) приводит не к упрощению, а к усложнению расчетов, так как, несмотря на аппроксимацию, система все равно остается нелинейной, а температура определяется по более громоздким выражениям. В то же время в двух других методах расчет температур выделен в отдельную вычислительную процедуру. Поэтому использование квадратичной аппроксимации в этих случаях приводит к существенному уменьшению объема расчетов: температуры определяются аналитически, а не численно. При этом потери точности практически не происходит [9].

Таким образом, метод совместного решения уравнений целесообразно применять для модели без упрощений, а метод внутренней температурной коррекции – для модели с квадратичной аппроксимацией.

Ниже приведены результаты соответствующих расчетов. При этом, хотя метод двойного итерационного процесса также может быть использован для модели с квадратичной аппроксимацией, при сравнительных расчетах была использована модель с упрощенными уравнениями теплового баланса [4]. Это не сказывается на сходимости, зато позволяет дополнительно оценить влияние точности уравнений на результаты расчета режимов.

3. Анализ результатов. Для сравнения методов между собой, а также с классическим методом, не учитывающим температуру, было рассмотрено четыре характерных режима (табл. 2, 3) сети с тремя линиями ($n=2$).

Таблица 2

Характеристика режимов, длины линий и марки проводов

№ режима	Характеристика	Марки проводов, длины линий		
		Л1, 40 км	Л2, 50 км	Л3, 60 км
1	Однородная сеть с невысоким отношением сопротивлений X/R , большие нагрузки	АС-70	АС-70	АС-70
2	Однородная сеть с высоким X/R , большие нагрузки	АС-240	АС-240	АС-240
3	Неоднородная сеть, большие нагрузки	АС-240	АС-70	АС-70
4	Однородная сеть с невысоким X/R , небольшие нагрузки	АС-70	АС-70	АС-70

Таблица 3

Мощности нагрузок и напряжения источников питания

№ режима	$P_{n,1}$, МВт	$P_{n,2}$, МВт	$Q_{n,1}$, Мвар	$Q_{n,2}$, Мвар	U_0 , кВ	\dot{U}_3 , кВ
1	55	55	29	25	120	120
2	125	125	65	75	121	$121e^{j3^\circ}$
3	100	75	60	35	120	$120e^{j5^\circ}$
4	30	45	20	25	120	$115e^{j3^\circ}$

Нагрузки заданы пологими статическими характеристиками с коэффициентами $a_1=0,4$; $a_2=0$; $a_0=0,6$; $b_1=-18$; $b_2=10$; $b_0=9$ [3] (такой вариант учитывает влияние напряжения на потребляемые мощности и в то же время достаточно близок к классическому способу задания нагрузок постоянной мощностью).

Условия охлаждения и параметры проводов приведены в (табл. 4, 5).

Таблица 4

Условия охлаждения

Параметр	Численное значение или расчетная формула
Температура окружающей среды $\Theta_{окр}$	-10 °С
Атмосферное давление $P_{атм}$	100000 Па
Скорость ветра V	1 м/с
Коэффициент угла атаки ветра k_V для линии 1	0,75

Коэффициент угла атаки ветра k_V для линий 2, 3	1
Плотность потока прямой солнечной радиации на поверхность, перпендикулярную солнечным лучам $q_{s,np}$	500 Вт/м ²
Плотность потока рассеянной солнечной радиации $q_{s,расс}$	100 Вт/м ²
Коэффициент k_{zm} , учитывающий затененность участков линий 1, 2	0,8
Коэффициент k_{zm} , учитывающий затененность участков линии 3	0,7
Угол между осью провода и направлением солнечных лучей φ_s для линии 1	$\pi/4$
Угол между осью провода и направлением солнечных лучей φ_s для линий 2, 3	$\pi/5$
Коэффициенты теплоотдачи $\alpha_{вын}$	$\alpha_{вын} = 0,044 \frac{k_V (P_{атм} V)^{0,6}}{(T_{окр} d_{np})^{0,4}} \quad [6]$
Плотности потока солнечной радиации на поверхности проводов $q_{солн}$	$q_{солн} = k_{zm} q_{s,np} \sin \varphi_s + \pi q_{s,расс} \quad [1]$

Таблица 5

Расчетные параметры проводов [9], [10]

Параметр	АС-70/11	АС-240/32
Диаметр провода d_{np}	0,0114 м	0,0216 м
Погонное активное сопротивление при 20°C r_{20}	0,422 Ом/км	0,118 Ом/км
Погонное активное сопротивление при 0°C $r_0 = r_{20} / (1 + \alpha \cdot 20)$	0,3886 Ом/км	0,1087 Ом/км
Погонное индуктивное сопротивление x_0	0,444 Ом/км	0,405 Ом/км
Погонная емкостная проводимость b_0	2,547 мкСм/км	2,808 мкСм/км
Температурный коэффициент сопротивления α	0,0043 °C ⁻¹	
Степень черноты поверхности провода ε_n	0,6	
Поглощательная способность поверхности провода для солнечного излучения A_s	0,6	
Допустимая температура провода $\Theta_{дон}$	70 °C	

В (табл. 6, 7) представлены результаты расчета режимов. Нумерация режимов соответствует таблице 2. Методы расчета пронумерованы следующим образом: 1 – совместное решение уравнений, модель без упрощений; 2 – двойной итерационный процесс, модель с упрощенными уравнениями теплового баланса [4]; 3 – внутренняя температурная

коррекция, модель с квадратичной аппроксимацией; 4 – стандартный метод, не учитывающий температуру.

Таблица 6

Напряжения и токи, число итераций

№ режима	№ метода	\dot{U}_1 , кВ	\dot{U}_2 , кВ	I, А			Число итераций
				Л1	Л2	Л3	
1	1	$103,7e^{-j2,54^\circ}$	$102,5e^{-j3,3^\circ}$	365,1	36,74	290	26
	2	$104,4e^{-j2,65^\circ}$	$102,9e^{-j3,36^\circ}$	367,3	38,92	285,8	14
	3	$103,7e^{-j2,54^\circ}$	$102,5e^{-j3,3^\circ}$	365,1	36,73	290	7
	4	$105,3e^{-j2,81^\circ}$	$103,4e^{-j3,44^\circ}$	369,7	41,91	281,1	3
2	1	$100,9e^{-j7,9^\circ}$	$97,35e^{-j8,38^\circ}$	848,2	100,8	726,4	13
	2	$101,2e^{-j7,97^\circ}$	$97,56e^{-j8,41^\circ}$	847,8	104	724,3	16
	3	$100,9e^{-j7,9^\circ}$	$97,35e^{-j8,38^\circ}$	848,2	100,8	726,4	6
	4	$102e^{-j8,12^\circ}$	$98,16e^{-j8,48^\circ}$	845,1	105,5	720,3	4
3	1	$101,6e^{-j5,74^\circ}$	$95,31e^{-j3,24^\circ}$	727,5	148,9	416,6	21
	2	$101,8e^{-j5,82^\circ}$	$95,36e^{-j3,31^\circ}$	729	151,9	416	17
	3	$101,6e^{-j5,74^\circ}$	$95,31e^{-j3,24^\circ}$	727,5	148,9	416,6	7
	4	$102,9e^{-j5,76^\circ}$	$97,9e^{-j3,23^\circ}$	698,7	126,3	424,5	4
4	1	$108,6e^{-j0,651^\circ}$	$104,3e^{-j0,439^\circ}$	265,5	84,46	201,5	21
	2	$108,8e^{-j0,725^\circ}$	$104,5e^{-j0,491^\circ}$	266,6	86,04	200,9	9
	3	$108,6e^{-j0,651^\circ}$	$104,3e^{-j0,439^\circ}$	265,5	84,46	201,5	6
	4	$108,7e^{-j0,742^\circ}$	$104,1e^{-j0,398^\circ}$	268,6	87,54	199,3	3

Таблица 7

Температуры и потери мощности

№ режима	№ метода	Потери активной мощности, кВт				Θ , °С		
		Л1	Л2	Л3	сумма	Л1	Л2	Л3
1	1	8068	76,6	6526	14671	69,31	-6,142	25,42

	2	7611	84,7	6275	13971	48,8	-9,459	22,78
	3	8069	76,58	6526	14672	69,36	-6,159	25,43
	4	6923	111,2	6001	13035	-	-	-
2	1	12178	162	11757	24098	69,25	-5,07	32,3
	2	11444	169,5	11691	23305	51,32	-9,24	32,35
	3	12181	162	11758	24100	69,31	-5,086	32,3
	4	10113	197	11019	21329	-	-	-
3	1	8299	1299	15742	25340	47,01	1,187	68,94
	2	7916	1336	15761	25013	32,99	-1,506	70,19
	3	8299	1300	15743	25341	46,99	1,194	68,98
	4	6912	1009	13688	21610	-	-	-
4	1	3714	408,4	2936	7057	30,13	-4,148	7,836
	2	3572	417,9	2887	6878	18,07	-7,334	5,236
	3	3714	408,4	2936	7058	30,13	-4,157	7,85
	4	3653	485,1	3017	7155	-	-	-

Из таблицы 6 видно, что наиболее медленную сходимость в среднем имеет метод № 1 – совместное решение уравнений электрического и теплового режима методом Ньютона. Метод № 2 – двойной итерационный цикл – обладает более быстрой сходимостью. Исключение – режим № 2, однако с учетом размерностей матрицы Якоби число вычислительных операций по методу № 2 в этом режиме также меньше, чем по методу № 1.

Наиболее хорошую сходимость из всех методов, учитывающих температуру, проявляет метод № 3 – внутренняя температурная коррекция.

Результаты расчета по моделям № 1 и 3 практически не отличаются друг от друга, что дополнительно подтверждает выводы, сделанные в [7]. В то же время модель № 2 дает существенно другие результаты. Это связано главным образом с тем, что данная модель не учитывает солнечную радиацию и направление ветра. Погрешности метода № 4 (не учитывающего температуру) относительно метода № 3 приведены в табл. 8.

Таблица 8

Погрешности расчета режимов, обусловленные неучетом температуры
(по данным табл. 6 и 7)

Параметр	Отклонение напряжения в узле от номинального $U-U_{ном}$	Ток в линии I	Потери активной мощности в линии ΔP_l	Суммарные потери активной мощности ΔP_Σ

Средний модуль погрешности	12,5%	4,3%	15,6%	9,69%
Максимальная погрешность	-25,4%	-15,2%	45,2%	-14,7%

Как и следовало ожидать, наибольшие погрешности наблюдаются для потерь активной мощности. Эти погрешности обусловлены двумя факторами: неточностью определения значений активных сопротивлений и неточностью определения значений токов. Проанализируем взаимное влияние этих факторов на примере режимов № 3, в котором наблюдалась наибольшая погрешность расчета суммарных потерь (-14,7 %). Для этого определим потери, которые наблюдались бы при фактических температурах (определенных методом № 3), но при токах, вычисленных без учета температурной зависимости сопротивлений (методом № 4):

$$\Delta P'_{\Sigma} = 3 \sum_{i=1}^3 I_i^2 r_{0,i} l_i (1 + \alpha \Theta_i) = 3(698,7^2 \cdot 0,1087 \cdot 40(1 + 0,0043 \cdot 46,99) + 126,3^2 \cdot 0,3886 \cdot 50(1 + 0,0043 \cdot 1,194) + 424,5^2 \cdot 0,3886 \cdot 60(1 + 0,0043 \cdot 68,98)) = 24932469 \text{ Вт} \approx 24932 \text{ кВт}.$$

Полученное значение больше, чем потери, рассчитанные без учета температурной зависимости сопротивления методом № 4 (21610 кВт), но не достигает точного значения потерь, рассчитанного методом № 3 (25341 кВт). Это значит, что неточности вычисления токов и активных сопротивлений в данном случае не компенсируют, а усиливают друг друга, приводя к повышению результирующей погрешности.

На основании изложенного материала можно сделать следующие выводы:

1. Неучет температурной зависимости активных сопротивлений при расчете режимов замкнутых сетей может приводить к значительным погрешностям.
2. При моделировании тепловых режимов линий в рамках поставленной задачи целесообразно учитывать солнечную радиацию и направление ветра.
3. Совместное решение уравнений электрического и теплового режимов методом Ньютона неэффективно из-за медленной сходимости. Вместо этого может быть использован предложенный в настоящей статье метод внутренней температурной коррекции, обладающий улучшенной сходимостью.

Список литературы

1. Бургсдорф, В.В. Определение допустимых токов нагрузки воздушных линий

электропередачи по нагреву их проводов / В. В. Бургсдорф, Л. Г. Никитина // Электричество. – 1989. – №11. – С. 1-8.

2. Гиршин, С.С. Моделирование и расчет стационарного режима однолинейной системы электроснабжения с учетом температуры проводников и уровней напряжения / С.С. Гиршин, В.Н. Горюнов, Я.Б. Сергеев // Омский научный вестник. – 2003. – №3. – С. 79-83.

3. Конюхова, Е.А. Выбор мощности батарей конденсаторов в цеховых сетях промышленных предприятий с учетом режимов напряжения / Е.А. Конюхова // Электричество. – 1998. – № 1. – С. 18-25.

4. Поспелов, Г.Е. Влияние температуры проводов на потери электроэнергии в активных сопротивлениях проводов воздушных линий электропередачи / Г.Е. Поспелов, В.В. Ершевич // Электричество. – 1973. – №10. – С. 81-83.

5. Расчет погрешности определения потерь электрической энергии в проводах повышенной пропускной способности из-за неучета атмосферных и климатических факторов / Е.В. Петрова [и др.] // Омский научный вестник. – 2013. – № 2. – С. 191–197.

6. Совершенствование методов расчета потерь электроэнергии в линиях электропередачи на основе математических моделей, учитывающих температуру проводов / А.А. Бубенчиков [и др.]; Омский гос. техн. ун-т. – Омск, 2009. –19 с. – Деп. в ВИНТИ 30.09.09, N609-B2009.

7. Совершенствование расчетов потерь в воздушных линиях электроэнергетических систем по результатам численного моделирования в условиях вариации нагрузки / Е.В. Петрова [и др.] // Омский научный вестник. – 2012. – № 3. – С. 242–248.

8. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д.Л. Файбисовича. – М.: ЭНАС, 2009. – 392 с.

9. 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.

10. Уточнение метода расчета температуры провода при постоянной нагрузке с учетом климатических факторов / С. С. Гиршин [и др.]; Омский гос. техн. ун-т. – Омск, 2010. – 23 с. – Деп. в ВИНТИ 08.04.2010, N198-B2010.

Рецензенты:

Харламов В.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Электрические машины и общая электротехника» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Омский государственный университет путей сообщения», г. Омск;

Кузнецов А.А., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая электротехника»

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Омский государственный университет путей сообщения»,
г. Омск.