

УДК 621:311

ПРИМЕНЕНИЕ КОМБИНИРОВАННЫХ УРАВНЕНИЙ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА И ТЕПЛООВОГО БАЛАНСА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

А.Б. БАЛАМЕТОВ*, Э.Д. ХАЛИЛОВ*

В традиционных расчетах установившегося режима электрической сети не учитываются зависимости активных сопротивлений провода воздушной линии от температуры окружающей среды и токов в ветвях. Для повышения точности расчетов установившегося режима требуется температурная коррекция сопротивления ветвей. В данной работе представлен метод, основанный на совместном решении нелинейных уравнений установившегося режима электрической сети и теплового баланса проводов воздушных линий. Результаты проведенных расчетов установившегося режима на различных тестовых схемах показали, что, неучет температурной зависимости активных сопротивлений может привести к ошибкам в потере мощности для отдельных нагруженных линиях до 10% и для суммарных потерь системы до 30%, что является недопустимым в моделировании режимов электрической сети. Приведены результаты моделирования установившихся режимов с учетом температурной зависимости сопротивлений проводов на примере 6 узловых схем.

Ключевые слова: *установившийся режим, уравнения теплового баланса, электрическая сеть, погодные условия, ток линии, активное сопротивление, температура провода, решение нелинейных уравнений.*

Введение. В связи с высокими темпами роста нагрузки максимальное использование пропускной способности воздушных линий (ВЛ) может быть достигнуто при наличии достоверной информации о состоянии линии, а также фактических данных о температуре проводов и плотности протекающего тока.

Для повышения точности расчета переменных потерь электроэнергии в воздушных линиях электропередачи необходима оценка активных сопротивлений проводов с учетом протекающего по линиям рабочего тока, температуры окружающего воздуха, скорости ветра и теплоты солнечного излучения.

При определении технологических потерь электрической энергии по электрическим сетям необходимо учитывать температуру провода, влияющую на величину активного сопротивления. Температура провода, в свою очередь, зависит от режимных и климатических

* Азербайджанский научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт энергетики

факторов: плотности тока, температуры окружающего воздуха t_v , силы и направления ветра, интенсивности солнечной радиации и др. [1–10]. Однако известные алгоритмы расчета установившегося режима электрических сетей (РУРЭС) и оценки состояния пренебрегают температурными зависимостями и в соответствующих программах сопротивления трансформаторов, воздушных линий и кабелей представляются постоянными. В связи с этим результаты РУРЭС имеют некоторую ошибку. В [1-10] показано, что пренебрежение коррекцией сопротивления ветви в зависимости от температуры может привести к существенным ошибкам в потерях при сильно загруженных режимах до 10% для общей схемы, а для отдельных ветвей до 30%.

Моделирование воздушных линий обычно предполагает постоянное сопротивление провода при исходно заданной температуре 20⁰С. Однако фактическая температура провода ВЛ обычно достигает 90-120⁰С и более. Таким образом, важно анализировать влияние повышения температуры при эксплуатации линии электропередачи на такие электрические величины, как потери и потоки мощности.

Целью данной работы является разработка алгоритма и оценка количественного влияния тока нагрузки, температуры провода, скорости ветра, солнечной радиации на активное сопротивление проводов, а также определение погрешностей расчета годовых переменных потерь электроэнергии.

В [6] предложена модель ВЛ, основанная на упрощении уравнения теплового баланса (УТБ) IEEE Std.738. При этом предполагается, что потери тепла из-за излучения и конвекции можно аппроксимировать как линейную функцию от температуры окружающей среды.

В [7] рассматривается температурная зависимость потокораспределения.

В традиционном сопротивлении проводов линий принимаются постоянными, потому что они оказывают небольшое влияние на изменение напряжения ЭС. Однако температура провода, сопротивление и потери являются взаимозависимыми и изменяются значительно при нормальном функционировании. Отказ от учета изменения сопротивления относительно температуры может привести к существенным ошибкам в результатах расчета.

В работах [4, 7, 10] исследуются различные алгоритмы температурно-зависимого потокораспределения:

- полный метод Ньютона-Рафсона;
- частично разделенный алгоритм, в котором температура обновляется отдельно от обычных переменных;
- быстрый разделенный метод;
- последовательно разделенный метод.

Учет температуры провода ВЛ необходим для мониторинга линий электропередач для учета тепловых ограничений и допустимости провисания (габарита), оценки потерь в рамках оценки состояния для распределения затрат в рыночных условиях (по узлам), оптимизации режима ЭЭС, изучения влияния температурной зависимости кольцевых ЭС на неоднородность ЭС.

Существует несколько методов для снижения ошибки в сопротивлении в зависимости от температуры, которые уже используются.

В данной работе предлагается подход для учета температурной зависимости сопротивлений энергетической системы. Температура является функцией потерь, потери

являются функцией сопротивления и тока, а сопротивление является зависит от температуры-температуры. В данном случае эти соотношения связываются с обычным потокораспределением с помощью одновременных уравнений для стационарных режимов сопротивлений, потерь и температур.

Удельное активное сопротивление проводов воздушных линий равно

$$R = R_{20} \cdot [1 + \alpha \cdot (t_{np} - 20)]$$

где R_{20} - удельное активное сопротивление при температуре провода 20°C , Ом/км; $\alpha = 0.00403$ - температурный коэффициент электрического сопротивления сталеалюминевых проводов, 1/град; t_{np} - температура провода, $^{\circ}\text{C}$.

Температура провода в формуле (1), как правило, неизвестна. Она зависит от большого числа факторов и, в первую очередь, от протекающего по проводу электрического тока, температуры окружающего воздуха и скорости ветра. В традиционных расчетах переменных потерь электроэнергии активные сопротивления принимаются по справочникам, в которых они приведены к температуре 20°C . В лучшем случае активные сопротивления пересчитываются с учетом температуры воздуха $t_{в}$.

Метод решения. Зависимость температуры провода от параметров внешней среды может быть представлена в виде уравнения теплового баланса провода, к коэффициенты которого для различных случаев впервые были получены Бургсдорфом [1].

Уравнение теплового баланса для установившегося теплового режима ВЛ записывается следующим образом [5, 8]:

$$I^2 \cdot R_{20} \cdot [1 + \alpha \cdot (t_{np} - 20)] + P_c = \pi d_{np} (k_k + k_l) (t_{np} - t_e) \quad (1)$$

где I - ток линии, А; R_{20} - сопротивление провода при 20°C , Ом/м; α - температурный коэффициент сопротивления провода, 1/ $^{\circ}\text{C}$; t_{np} - температура провода, $^{\circ}\text{C}$; t_e - температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$; k_k , k_l - коэффициент теплоотдачи провода при конвективном и лучистом теплообмене, Вт/(m^2C); P_c - теплота солнечного излучения, поглощаемая 1 м провода в единицу времени, Вт; d_{np} - диаметр провода, м.

В уравнении (2) левая часть представляет собой поглощаемую теплоту солнечного излучения и теплоту от токовой нагрузки, а правая часть состоит из суммы конвективных потерь и потерь на радиацию.

Коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием определяется по формуле Стефана-Больцмана [3,5]:

$$k_l = \frac{5.67\varepsilon}{t_{np} - t_e} \left[\left(\frac{273 + t_{np}}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + t_e}{100} \right)^4 \right] \quad (2)$$

где ε - постоянная лучеиспускания (степень черноты провода).

Коэффициент теплоотдачи конвекцией в общем виде определяется исходя из критериальных уравнений конвективного теплообмена. Однако в реальных условиях всегда есть некоторое движение воздуха. Согласно результатам исследований, при антициклоническом характере погоды минимальную скорость ветра можно принять равной

0.6 м/с, при циклоническом характере погоды - 2 м/с [6]. По опубликованным материалам сессии СИГРЕ также рекомендуется принимать минимальную скорость ветра 0.6 м/с [5].

Большинство авторов [1, 5] сходятся на том, что при малых скоростях ветра ($v < 5$ м/с) коэффициент теплоотдачи конвекцией приближенно рассчитывается по выражению:

$$\alpha_k = 3.5\psi \sqrt{\frac{\gamma}{d}} \quad (3)$$

где ψ - коэффициент зависимости теплоотдачи при конвективном теплообмене от угла атаки ветра ψ_v

Тепловое моделирование элементов энергетических систем. Сопротивление проводов пропорционально температуре в соответствии с [6]:

$$R_t = R_{20} \cdot \left(\frac{t_{np} + T_F}{20 + T_F} \right) \quad (4)$$

где R_t - сопротивление провода; T - температура провода; R_{20} - сопротивление провода при температуре 20°C; T_F - температурная константа.

Температурная константа T_F зависит от металла провода: 234,5 °C для меди, 228,1 °C для алюминия [6].

В модели теплового сопротивления, повышение температуры устройства принимается линейно пропорциональной тепловой мощности устройства, то есть потерям устройства:

$$\frac{t_{np} - t_e}{\Delta P_t} = R_\theta. \quad (5)$$

Температура провода не может быть ниже, чем температура окружающей среды t_e . Температура провода t_{np} равна сумме температуры окружающей среды t_e и повышения температуры провода Δt над окружающей средой $t_{np} = t_e + \Delta t$. Таким образом, для температуры провода из (2) получаем

$$t_{np} = t_e + R_\theta \cdot \Delta P_t \quad (6)$$

Выражая ΔP в виде функции от напряжения энергосистемы и температуры состояния T , выражение (3) может быть непосредственно включено в алгоритм расчета УУР.

Согласно [7], при нормальных условиях эксплуатации Q_l и Q_k могут быть аппроксимированы как линейные функции повышения температуры провода над окружающей воздухом, то есть

$$Q_l \approx K_l (t_{np} - t_e), \quad Q_k \approx K_k (t_{np} - t_e). \quad (7)$$

Коэффициенты конвективного и лучистого теплообмена Q_l и Q_k постоянны для заданных условий: температуры окружающей среды, барометрического давления и скорости ветра [7]. Используя Q_l и Q_k , (5) можно представить в виде:

$$Q_l + Q_k = (K_l + K_k) \cdot \Delta t. \quad (8)$$

Использование нагрева провода солнечным излучением (радиацией) $Q_p = P_p d_{np}$ позволяет модифицированную версию (3) написать для проводов воздушной линии:

$$t_{np} = t_e + (\Delta P + Q_p) \cdot \frac{1}{K_n + K_k}. \quad (9)$$

Для любого заданного провода Q_n , Q_k и Q_p могут быть определены по заданным погодным условиям принимаемыми постоянными для решения УУР ЭС с учетом изменений температуры проводов.

Уравнения установившихся режимов с учетом температурной зависимости сопротивлений. Как было отмечено выше, уравнения установившихся режимов с учетом температурной зависимости сопротивлений используют три основные модификации обычного УУР методом Ньютона-Рафсона:

$$P_i(\delta, U, T) = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij}(T) \cdot \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij}(T) \cdot \sin(\delta_i - \delta_j)) = P_{z,i} - P_{n,i} \quad (10)$$

$$Q_i(\delta, U, T) = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij}(T) \cdot \sin(\delta_i - \delta_j) - B_{ij}(T) \cdot \cos(\delta_i - \delta_j)) = Q_{z,i} - Q_{n,i} \quad (11)$$

$$H_{ij}(\delta, U, T) = T_{ij} - (T_e + R_{\theta,ij} \cdot g_{ij}(T) \cdot (U_i^2 + U_j^2)) - 2g_{ij}(T) \cdot U_i \cdot U_j \cos(\delta_i - \delta_j). \quad (12)$$

УУР (10) – (11) отличаются от обычных тем, что G_{ij} и B_{ij} являются функцией температуры согласно (1).

Вычисление небалансов производится по уравнениям:

$$\Delta P_i = (P_{z,i} - P_{n,i}) - P_i(\delta, U, T) \quad (13)$$

$$\Delta Q_i = (Q_{z,i} - Q_{n,i}) - Q_i(\delta, U, T) \quad (14)$$

$$\Delta H_{ij} = 0 - H_{ij}(\delta, U, T). \quad (15)$$

Небалансы, полученные по (13-15), позволяют уточнить вектор состояния решением уравнений (10-12) методом Ньютона-Рафсона. В связи с добавлением температуры к вектору состоянию матрица Якоби представляется следующим образом:

$$J(\delta, U, T) = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial U} & \frac{\partial P}{\partial T} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial U} & \frac{\partial Q}{\partial T} \\ \frac{\partial H}{\partial \delta} & \frac{\partial H}{\partial U} & \frac{\partial H}{\partial T} \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Составляющие частных производных H относительно δ и U могут быть рассчитаны из (12).

Активная и реактивная проводимости ветви ij являются функцией параллельного активного и реактивного сопротивлений:

$$g_{ij} = \frac{r_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2}, \quad b_{ij} = \frac{x_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2}.$$

Частные производные неявной функции по температуре провода определяются по

$$\frac{\partial P}{\partial T_{kn}} = \frac{\partial P_i}{\partial g_{kn}} \cdot \frac{\partial g_{kn}}{\partial R_{kn}} \cdot \frac{\partial R_{kn}}{\partial T_{kn}} + \frac{\partial P_i}{\partial b_{kn}} \cdot \frac{\partial b_{kn}}{\partial R_{kn}} \cdot \frac{\partial R_{kn}}{\partial T_{kn}}. \quad (17)$$

После определения матрицы Якоби уточняются зависимые переменные уравнений:

$$\begin{bmatrix} \delta^{(v+1)} \\ U^{(v+1)} \\ T^{(v+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta^{(v)} \\ U^{(v)} \\ T^{(v)} \end{bmatrix} + J(\delta^{(v)}, U^{(v)}, T^{(v)})^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \Delta P^{(v)} \\ \Delta Q^{(v)} \\ \Delta H^{(v)} \end{bmatrix} \quad (18)$$

Полные температурно-зависимые УУР. Уравнения узловых напряжений и теплового баланса решаются как единая система методом Ньютона-Рафсона.

На рис. 1 приведен алгоритм полных температурно-зависимых УУР, который выполняет следующие шаги:

1. сопротивления ветвей уточняются в соответствии с последним уточнением температуры проводов;
2. уточняется матрица узловых проводимостей;
3. вычисляется матрица Якоби;
4. вычисляются небалансы по (13) - (15);
5. переменные уравнений уточняются в соответствии с (18).

Цикл повторяется до получения желаемой точности по пунктам 1-5.

Из-за различий уравнений теплового баланса от уравнений узловых напряжений ухудшается сходимость вычислительного процесса.

В частично разделенном методе температурно-зависимого решения УУР уравнения вектора напряжения состояния отделены от уравнений температурного состояния:

$$\begin{bmatrix} \delta^{(v+1)} \\ U^{(v+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta^{(v)} \\ U^{(v)} \end{bmatrix} + J_{PQ}(\delta^{(v)}, U^{(v)}, T^{(v)})^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \Delta P^{(v)} \\ \Delta Q^{(v)} \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$T^{(v+1)} = T^{(v)} + J_H(\delta^{(v)}, U^{(v)}, T^{(v)})^{-1} \cdot \Delta H^{(v)}. \quad (20)$$

Затем производится уточнение вектора состояния в соответствии с

$$\delta^{(v+1)} = \delta^{(v)} + J_P^{-1} \cdot \Delta P^{(v)} \quad (21)$$

$$U^{(v+1)} = U^{(v)} + J_Q^{-1} \cdot \Delta Q^{(v)} \quad (22)$$

$$T^{(v+1)} = T^{(v)} + J_H^{-1} \cdot \Delta H^{(v)}. \quad (23)$$

Разделенные алгоритмы могут быть включены в существующие программы УУР, так как расчеты температуры можно рассматривать как отдельный модуль.

Алгоритмы последовательного уточнения температуры сначала решают обычные УУР на основе оценок фиксированной температуры. Далее вычисляются температуры ветвей на основе результатов РУРЭС и используют температуру для обновления сопротивлений и $Y_{\text{узл}}$. Небалансы мощности и температуры затем пересчитываются по уточненным проводимостям. Процесс продолжается с традиционными УУР с использованием уточненного $Y_{\text{узл}}$. Основными преимуществами последовательного подхода являются простота, а также возможность легко использовать известные алгоритмы потока мощности. Недостатком является решение УУР при каждом изменении температуры. Алгоритм может требовать больше времени. Однако может быть сходиться быстрее, так как требуется минимальное время для оценки температур и решения УУР.

Практическая реализация УУР-ТЗ такова: температуру окружающей среды по всей системе можно получить по датчикам, установленным в ВЛ. Эти измерения могут быть получены из системы сбора данных (SCADA). Другим вариантом было бы получить данные о температуре от подсистемы «прогноз погоды» в сочетании с нагрузкой.

Моделирование. Разработана MATLAB программа расчета РУРЭС-ТМ. Алгоритмы РУРЭС с учетом температурной зависимости активного сопротивления применялись для двух тестовых систем:

1. 6-узловая эквивалентная схема 110 кВ (рис.2).
2. Модифицированная версия тестовой 6-узловой системы IEEE (рис.3).

Все ветви были смоделированы с использованием общей термической модели согласно (3). Все провода считаются алюминиевыми. Температура окружающей среды принята 25°C. Номинальные нагрузочные потери $P_n = I^2R$, получены при напряжении 1.0 о.е.

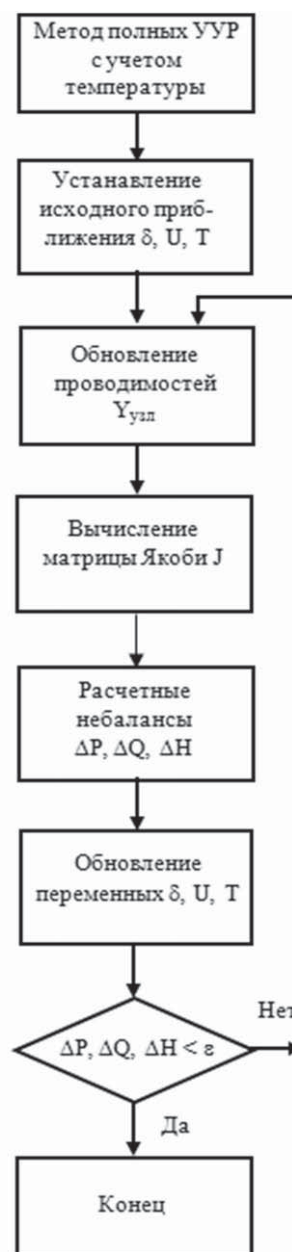


Рис. 1. Алгоритм температурно-зависимых УУР

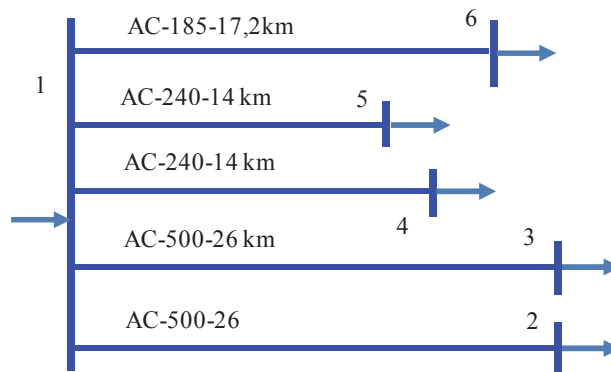


Рис. 2. 6-узловая эквивалентная схема 110 кВ

В таблице 1 представлены результаты расчета потерь мощности с учетом изменения температуры провода от потока мощности для схемы рис.2.

Таблица 1.

Результаты расчета установившегося режима по разработанной программе для эквивалентной схемы с 6 узлами.

Ветви	Мощность МВА	Тгр °С	Сопротивление о.е	Результаты потерь мощности РУР		
				Традиционные, МВт	С учетом температуры, МВт	Относительное повышение, %
1-2	180	53.60	0.0140	4.27	4.785	11.928
1-3	170	50.12	0.0139	3.80	4.201	10.424
1-4	100	45.38	0.0155	1.41	1.53	8.511
1-5	80	37.86	0.0150	0.92	0.96	4.348
1-6	45	29.60	0.0227	0.38	0.39	2.632
Суммарные потери				10.79	11.87	9.97

Учет температурной зависимости в УУР увеличивает суммарные потери в нагруженных линиях. Суммарные потери по традиционному РУРЭС 10.79 МВт и в зависимости от температуры для отдельных ветвей приводит до 12%, а для общей схемы 10%.

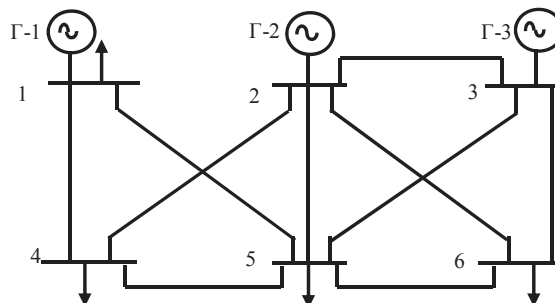


Рис. 3. 6-узловая тестовая схема IEEE

Генерация и потребление в узлах 6-и узловой схемы в о.е. приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Нагрузки узлов 6-и узловой тестовой схемы IEEE.

№ узлов/мощности		1	2	3	4	5	6
Генерация	$P_{ген}$	1.0569	0.5	0.6	0	0	0
	$Q_{ген}$	0.1715	0.74	0.8812	0	0	0
Потребление	$P_{наг}$	0	0	0	0.75	0.68	0.65
	$Q_{наг}$	0	0	0	0.7	0.7	0.7

В таблице 3 представлены результаты расчета потерь мощности с учетом изменения температуры провода от потока мощности для схемы рис.3.

Таблица 3.

Результаты расчета установившегося режима для схемы рис. 3.

Номера ветвей	Температура, °C	Результаты потерь мощности РУП		
		Традиционные, МВт	С учетом температуры, МВт	Относительное повышение, %
1-2	37.75	0.9049	0.9773	7.99
1-4	40.1	1.0876	1.1574	6.42
1-5	44.2	1.0735	1.1678	8.78
2-3	26.01	0.0403	0.0407	1.00
2-4	47.02	1.5051	1.6289	8.23
2-5	37.82	0.4979	0.5274	5.91
2-6	27.06	0.5833	0.5888	0.94
3-5	29.33	1.0936	1.1275	3.10
3-6	43.3	1.0034	1.0806	7.69
4-5	25.57	0.0362	0.0385	6.18
5-6	25.69	0.0496	0.0528	6.49

Различия в расчетной потере являются наиболее выраженным для сильно нагруженных линий. Максимальное увеличение потерь мощности для ветвей тестовой схемы IEEE составило $0.94 \div 8.78\%$. Суммарные потери увеличились на 6.5%.

Практическое решение уравнений установившегося режима ЭС с учетом теплового баланса можно проводить по температуре окружающей среды по датчикам, установленным и эксплуатируемым в реальных условиях и по данным SCADA системы.

Другим вариантом является получение данных о температуре от внешних подсистем, таких как модуль прогноза погоды в сочетании с нагрузкой.

Более высокое разрешение при измерении температуры по всем элементам исследуемой системы может повысить достоверность расчетов установившегося режима ЭС.

Заключение. В настоящее время есть необходимость специальных компьютерных программ, включающих модели электрической сети, включающих УУР и уравнения теплового баланса для анализа установившихся режимов, позволяющих осуществлять непосредственную оценку значений температуры элементов ЭС.

Исследованы алгоритмы решения уравнений электрического и теплового режимов. Предложены алгоритмы, учитывающие температурные зависимости активных сопротивлений, которые улучшают оценку потерь по сравнению с традиционным потокораспределением.

Проведено сравнение полных и разделенных алгоритмов потокораспределения и проведено их сравнение на тестовых задачах. Результаты анализа на тестовых схемах электрической сети показывает, что температура оказывает существенное влияние на распределение потоков и потерь мощности.

REFERENCES

1. **Burgsdorf V.V., Nikitina L.G.** Opredelenie dopustimyh tokov nagruzki vozduzhnyh linij elektroperedachi po toku ih provodov // Elektrichestvo. 1989. № 11. с. 1–8.
Бургсдорф В.В., Никитина Л.Г. Определение допустимых токов нагрузки воздушных линий электропередачи по току их проводов // Электричество. 1989. № 11. с. 1–8.
2. Guide for Thermal Rating Calculations of Overhead Lines. WG B2.43, Tech. Rep. 601, CIGRE, 2014, 95 p.
3. **Figurnov E.P., Zharkov Y.I., Petrova T.E.** Utochnennaja metodika rascheta nagreva provodov vozduzhnyh linij elektroperedachi // Elektricheskie stancii. 2013. № 9. S. 54–59.
Фигурнов Е.П., Жарков Ю.И., Петрова Т.Е. Уточненная методика расчета нагрева проводов воздушных линий электропередачи // Электрические станции. 2013. № 9. С. 54–59.
4. **J. R. Santos, A. G. Exposito, and F. P. Sanchez,** “Assessment of conductor thermal models for grid studies,” IET Generation Transmission & Distribution, vol. 1, no. 1, pp. 155–161, Jan. 2007.
5. **Levchenko I.I.** Nagruzochnaja sposobnost vozduzhnyh linij elektroperedachi v ekstremal'nyh pogodnyh uslovijah / I.I. Levchenko, E.I. Saucuk // Elektrichestvo. – 2008. – №4. – S. 2–8.
Левченко И.И. Нагрузочная способность воздушных линий электропередачи в экстремальных погодных условиях / И.И. Левченко, Е.И. Сацук // Электричество. – 2008. – №4. – С. 2–8.
6. IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature of Bare Overhead Conductors, IEEE Std. 738, 2006.
7. **S. Frank, J. Sexauer, and S. Mohagheghi,** “Temperature dependent power flow source code,” 2013. [Online]. Available: <https://github.com/TDPF/TDPF>.
8. **Balametov A.B., Bajramov M.P.** Modelirovanie temperatury provoda dlya rascheta poter elektroenergii vozduzhnyh linij // Problemy energetiki, 2013, № 2, s. 3-12.
Баламетов А.Б., Байрамов М.П. Моделирование температуры провода для расчета потерь электроэнергии воздушных линий // Проблемы энергетики, 2013, № 2, с. 3-12.
9. **Balametov A.B., Halilov E.D., Bajramov M.P., Agahanova K.A.** Programma modelirovaniya temperatury provoda i poter moshhnosti na osnove ucheta rezhimnyh i atmosferyh faktorov. Programmnye produkty i sistemy / Software & Systems 2 (31) 2018.
Баламетов А.Б., Халилов Э.Д., Байрамов М.П., Агаханова К.А. Программа моделирования температуры провода и потерь мощности на основе учета режимных и атмосферных факторов. Программные продукты и системы / Software & Systems 2 (31) 2018.
10. **Balametov A.B., Halilov E.D., Isaeva T.M.** Uchet temperaturnoj zavisimosti soprotivlenij vozduzhnyh linij pri ustanovivshisya rezhimah elektricheskoi seti / Fyodorovskie chteniya - 2017: XLVII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya. Moskva, 15-17 noyabrya 2017 g. - M.: Izdatelskij dom MEI, 2017. - 340 s.
Баламетов А.Б., Халилов Э.Д., Исаева Т.М. Учет температурной зависимости сопротивлений воздушных линий при установившихся режимах электрической сети / Фёдоровские чтения - 2017: XLVII Международная научно-практическая конференция. Москва, 15-17 ноября 2017 г. - М.: Издательский дом МЭИ, 2017. - 340 с.

**ELEKTRİK ŞƏBƏKƏLƏRİNİN REJİMLƏRİNİN MODELƏŞDİRİLMƏSİ ÜÇÜN QƏRARLAŞMIŞ
REJİM VƏ İSTİLİK BALANSI TƏNLİKLƏRİNİN BİRGƏ TƏTBİQİ**

Ə.B. BALAMETOV, E.D. XƏLİLOV

Qərarlaşmış rejimlərin ənənəvi həllində hava xətti məftilinin aktiv müqavimətinin ətraf mühitin temperaturundan və budaqlardakı cərəyanlardan asılılığı nəzərə alınmır. Qərarlaşmış rejimlərin həllinin dəqiqliyinin artırılması üçün budaqların müqavimətinin temperatur korreksiyası tələb olunur. Bu məqalədə qərarlaşmış rejimlərin və hava xətti məftilinin istilik balansının qeyri-xətti tənliklərinin birgə həllinə əsaslanan metod təklif olunmuşdur. Müxtəlif test sxemləri üzərində yerinə yetirilən hesablamaların nəticələri göstərir ki, aktiv müqavimətlərin temperatur asılılığının nəzərə alınmaması ayrı-ayrı yüklənmiş xətlərdəki itkilərin qiymətində 10%, sistem üzrə isə 30%-ə qədər xətalara gətirir ki, bu da elektrik şəbəkələri rejimlərinin modelləşdirilməsində yol verilməzdir. 6 düyünlük test sxemləri nümunəsində müqavimətlərin temperatur asılılığını nəzərə almaqla yerinə yetirilmiş hesablatların nəticələri verilmişdir.

Açar sözlər: qərarlaşmış rejimlər, istilik balans tənlikləri, elektrik şəbəkəsi, pogodnye hava şəraiti, xəttin cərəyanı, aktiv müqavimət, məftilin temperaturu, qeyri-xətti tənliklərin həlli.

**APPLICATION OF COMBINED EQUATIONS OF THE STEADY-STATE AND THERMAL BALANCE
FOR MODELING ELECTRICAL NETWORK MODES**

A.B. BALAMETOV, E.D. HALILOV

In the traditional calculations of the steady-state mode of the electrical network, the dependences of the active resistances of the air-line wire on the ambient temperature and currents in the branches are not taken into account. To increase the accuracy of steady-state calculations, a temperature correction of the resistance of the branches is required. In this paper, we present a method based on the joint solution of nonlinear equations of the steady-state electric network regime and the thermal balance of the wires of overhead lines. The results of the calculations of the steady-state regime on various test circuits showed that the non-account of the temperature dependence of the active resistances can lead to errors in power loss for individual loaded lines up to 10% and for total losses of the system up to 30%, which is unacceptable in modeling the modes of the electric network. The results of simulation of steady-state regimes with allowance for the temperature dependence of the resistance of wires are presented using the example of 6-node circuits.

Keywords: steady state, heat balance equations, electric network, weather conditions, line current, active resistance, wire temperature, solution of nonlinear equations.
