

## УПРОЩЕННАЯ ФОРМУЛА ДЛЯ НАГРУЗОЧНЫХ ПОТЕРЬ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАТУРЫ

Рассмотрено применение упрощенной формулы для расчета потерь активной мощности в линиях электропередачи с учетом температуры в условиях стационарного теплового режима. Приведены результаты сравнения потерь, вычисленных по упрощенной формуле и на основе решения полного уравнения теплового баланса для проводов различных типов. Построены и проанализированы зависимости погрешности расчета от тока нагрузки с учетом и без учета солнечной радиации.

**Ключевые слова:** линии электропередачи, потери мощности, температурная зависимость активного сопротивления.

**Введение.** Нагрузочные потери энергии в линиях электропередачи составляют около 85 % от общих потерь в линиях и около 55 % от суммарных потерь в электрических сетях России [1]. Повышение экономичности передачи электроэнергии предъявляет довольно высокие требования к точности расчета потерь. Это, в свою очередь, приводит к необходимости учета всех основных факторов, определяющих величину потерь. Одним из этих факторов является температурная зависимость активного сопротивления.

Работы в области учета температуры проводов при расчете потерь энергии в электрических сетях появились достаточно давно [2] и развиваются в настоящее время [3–9]. Тем не менее соответствующие методы не получили широкого распространения. Так, в современных программах для расчета потерь энергии обычно учитывается только зависимость активных сопротивлений от температуры окружающей среды, но не нагрев током. Основная причина этого состоит в том, что для точного расчета температуры требуется довольно большое количество дополнительных исходных данных.

Проблему можно сформулировать следующим образом: требуется разработать такие методы расчета потерь энергии, которые учитывали бы как температуру окружающей среды, так и нагрев проводов токами нагрузки, но при этом требовали бы минимального количества исходных данных.

Один из способов решения этой проблемы применительно к воздушным линиям рассмотрен в [10].

Настоящая статья представляет собой продолжение этой работы. Но если в [10] рассматривалось главным образом сравнение методов расчета потерь с учетом и без учета нагрева, то в данной статье упрощенная формула для потерь с учетом нагрева сравнивается с более сложными методами.

**Основные уравнения и расчетные формулы.** В установившемся тепловом режиме температура поверхности изолированного провода  $\Theta_{\text{внеш}}$  может быть вычислена по уравнению теплового баланса на единицу длины линии [11]

$$\frac{\Delta P_0(1 + \alpha \Theta_{\text{внеш}})}{1 - \alpha \Delta P_0 S_{\text{из}}} = d_{\text{пр}} [\pi \alpha_{\text{вын}} (\Theta_{\text{внеш}} - \Theta_{\text{окр}}) + \pi \varepsilon_n C_0 (T_{\text{внеш}}^4 - T_{\text{окр}}^4) - A_s q_{\text{солн}}], \quad (1)$$

где  $\Delta P_0 = I^2 r_0$  — потери активной мощности в проводе при погонном сопротивлении  $r_0$ , приведенном к 0 °С;  $I$  — ток;  $\alpha$  — температурный коэффициент сопротивления;  $\Theta_{\text{внеш}}$  и  $\Theta_{\text{окр}}$  — температуры поверхности провода и окружающей среды в °С;  $d_{\text{пр}}$  — диаметр провода;  $S_{\text{из}}$  — погонное тепловое сопротивление изоляции;  $\alpha_{\text{вын}}$  — коэффициент теплоотдачи вынужденной конвекцией;  $\varepsilon_n$  — коэффициент черноты поверхности провода для инфракрасного излучения;  $C_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) — постоянная излучения абсолютно черного тела;  $T_{\text{внеш}}$  и  $T_{\text{окр}}$  — абсолютные температуры поверхности провода и окружающей среды;  $A_s$  — поглощательная способность поверхности провода для солнечного из-

лучения;  $q_{\text{солн}}$  — плотность потока солнечной радиации на провод.

Уравнение (1) записано при допущении, что температурный градиент в жиле провода равен нулю. Тогда температура жилы провода  $\Theta_{\text{пр}}$  связана с температурой его поверхности простым соотношением

$$\Theta_{\text{пр}} = \Theta_{\text{внеш}} + \Delta P \cdot S_{\text{из}}, \quad (2)$$

где  $\Delta P$  — потери активной мощности, представляющие собой левую (а также правую) часть уравнения (1).

В уравнении (1) потери в левой части записаны как функция температуры поверхности провода (с целью исключения температуры жилы). Нетрудно показать, что соотношение

$$\Delta P = \frac{\Delta P_0 (1 + \alpha \Theta_{\text{внеш}})}{1 - \alpha \Delta P_0 S_{\text{из}}} \quad (3)$$

эквивалентно формуле

$$\Delta P = \Delta P_0 (1 + \alpha \Theta_{\text{пр}}). \quad (4)$$

Неизолированный провод можно рассматривать как частный случай, когда  $S_{\text{из}} = 0$ . При отсутствии изоляции уравнение теплового баланса принимает вид

$$\begin{aligned} & \Delta P_0 (1 + \alpha \Theta_{\text{пр}}) = \\ & = d_{\text{пр}} [\pi \alpha_{\text{вын}} (\Theta_{\text{пр}} - \Theta_{\text{окр}}) + \pi \varepsilon_n C_0 (T_{\text{пр}}^4 - T_{\text{окр}}^4) - A_s q_{\text{солн}}]. \quad (5) \end{aligned}$$

Используя приведенные выше формулы, можно определить температуру провода и потери активной мощности с учетом нагрева. Основной недостаток такого подхода состоит в большом количестве дополнительных исходных данных: требуется знать параметры  $\Theta_{\text{окр}'}$ ,  $S_{\text{из}'}$ ,  $\alpha_{\text{вын}'}$ ,  $\varepsilon_n'$ ,  $A_s'$ ,  $q_{\text{солн}'}$ . Наибольшую проблему представляют коэффициент теплоотдачи и солнечная радиация, которые определяются всем набором метеорологических условий и меняются не только во времени, но и по трассе каждой линии (в частности,  $\alpha_{\text{вын}}$  и  $q_{\text{солн}}$  зависят от азимута оси провода).

Основная идея упрощения задачи состоит в линеаризации уравнений (1) и (5) следующим образом [10]:

$$3I^2 R_0 (1 + \alpha \Theta_{\text{пр}}) = A (\Theta_{\text{пр}} - \Theta_{\text{окр}}), \quad (6)$$

где  $R_0$  — активное сопротивление провода при 0 °С;  $A$  — постоянный коэффициент, определяющий интенсивность передачи тепла от провода в окружающую среду.

Уравнение (6) считается справедливым как для неизолированных, так и для изолированных проводов. Расчет на одну фазу и на единицу длины в данном случае уже не имеет смысла, поэтому уравнение (6) записано для трехфазной линии, а сопротивление  $R_0$  приведено к фактической длине. Таким образом, левая часть уравнения (6) представляет собой потери мощности во всей линии.

Разрешив (6) относительно температуры провода и подставив результат в левую часть уравнения, получим окончательную формулу для потерь в линии с учетом нагрева [10]:

$$\Delta P = \frac{3R_0 (1 + \alpha \Theta_{\text{окр}}) I^2}{1 - \frac{3R_0 \alpha}{A} I^2}. \quad (7)$$

Числитель в этом выражении представляет собой потери, приведенные к температуре окружающей среды, а знаменатель учитывает увеличение потерь вследствие нагрева проводов током нагрузки.

Коэффициент  $A$  определяется по уравнению (6) при максимально допустимом токе  $I_{\text{гон}}$ :

$$A = \frac{3I_{\text{гон}}^2 R_0 (1 + \alpha \Theta_{\text{гон}})}{\Theta_{\text{гон}} - \Theta_{\text{окр1}}}, \quad (8)$$

где  $\Theta_{\text{гон}}$  — максимально допустимая температура провода;  $\Theta_{\text{окр1}}$  — температура окружающей среды, к которой приведен допустимый ток.

Видно, что формулы (7) и (8) требуют гораздо меньшего количества исходных данных по сравнению с уравнениями (1) и (5). Из всего набора метеорологических параметров требуется знать только температуру окружающей среды.

**Сравнительный анализ.** Ниже представлены результаты сравнения температуры провода и потерь мощности в линии, вычисленных по упрощенным уравнениям (6)–(8) и на основе полных моделей (1), (2), (5). В качестве объектов сравнения выбраны:

- неизолированные провода стандартной конструкции АС-240/32;
- высоковольтные изолированные провода СИП-3 1×95;
- высокотемпературные неизолированные провода АССР-405-Т16.

Во всех случаях рассматривается трехфазная система проводов. Параметры проводов и условия охлаждения представлены в табл. 1.

Коэффициент теплоотдачи, тепловое сопротивление изоляции и плотность потока солнечной радиации определялись по следующим формулам [3, 4, 7]:

$$\alpha_{\text{вын}} = 0,044 \frac{k_v (P_{\text{амм}} V)^{0,6}}{(T_{\text{окр}} d_{\text{пр}})^{0,4}}, \quad (9)$$

$$S_{\text{из}} = \frac{1}{2\pi \lambda_{\text{из}}} \ln \left( \frac{d_{\text{пр}}}{d_{\text{ж}}} \right), \quad (10)$$

$$q_{\text{солн}} = k_{\text{зм}} q_{\text{s,пр}} \sin \phi_s + \pi q_{\text{s,расс}}. \quad (11)$$

Максимальное значение прямой солнечной радиации у земной поверхности составляет около 1000 Вт/м<sup>2</sup> [14]. Однако такое значение не может использоваться для вычисления потерь энергии, так как прямая солнечная радиация имеет годовой и суточный ход, снижаясь до нуля в ночные часы. Поэтому в расчетах использовалось осредненное значение, в качестве которого в первом приближении была принята половина максимума, то есть  $q_{\text{s,пр}} = 500$  Вт/м<sup>2</sup>.

Рассеянная радиация также имеет годовой и суточный ход. Данные [14] позволяют принять в качестве типовой величины  $q_{\text{s,расс}} = 100$  Вт/м<sup>2</sup>.

Коэффициент затененности  $k_{\text{зм}}$  показывает, какая доля от общей длины линии в среднем освещена солнцем в дневные часы. Значение  $k_{\text{зм}} = 0,7$  выбрано с учетом того, что основная часть существующих линий проходит на достаточно больших расстояниях от высоких сооружений. Для линий 110 кВ и выше следует ожидать еще более высоких значений коэффициента затененности, так как опоры имеют большую высоту, а основная часть линий

## Исходные данные для расчетов

Наименование и обозначение параметра	Численное значение		
	АС-240/32 [1]	СИП-3 1×95 [12]	АССР-405-Т16 [13]
Справочное погонное активное сопротивление при 20 °С $r_{20}$ или при 25 °С (для провода АССР) $r_{25}$ , Ом/км	0,118	0,363	0,1369
Погонное активное сопротивление при 0 °С $r_0$ , Ом/км	0,10866	0,33425	0,12361
Температурный коэффициент сопротивления $\alpha$ , °С <sup>-1</sup>	0,0043		
Диаметр провода $d_{np}$ , м	0,0216	0,016	0,0201
Диаметр токопроводящей жилы провода $d_{ж'}$ , м	—	0,0113	—
Атмосферное давление $P_{атм'}$ , Па	100000		
Скорость ветра $V$ , м/с	1		
Коэффициент угла атаки ветра $k_v$	1		
Плотность потока прямой солнечной радиации на поверхность, перпендикулярную солнечным лучам $q_{s,пр'}$ , Вт/м <sup>2</sup> [7]	500		
Плотность потока рассеянной солнечной радиации $q_{s,расс'}$ , Вт/м <sup>2</sup> [7]	100		
Коэффициент $k_{зм}$ , учитывающий затененность участков линии	0,7		
Угол между осью провода и направлением солнечных лучей $\phi_s$	$\pi/4$		
Степень черноты поверхности провода $\epsilon_n$	0,6	0,8	0,6
Поглощательная способность поверхности провода для солнечного излучения $A_s$	0,6	0,9	0,6
Допустимая температура $\Theta_{гон'}$ , °С	70	90	210
Температура окружающей среды $\Theta_{окр'}$ , °С	– 20 или – 5	– 20	– 20
Коэффициент теплопроводности изоляции $\lambda_{из'}$ , Вт/(м·°С)	—	0,4 [15]	—

проходит в ненаселенной местности. Однако для линий 10 кВ, располагающихся вблизи коммуникаций, коэффициент затененности может быть, наоборот, ниже.

Угол между осью провода и направлением солнечных лучей  $\phi_s$  принят равным 45 ° как среднее значение между нулем и 90 °. В реальных условиях он определяется средним азимутом провода и шириной местности.

В табл. 2–5 и на рис. 1–5 представлены результаты сравнения потерь и температур для рассматриваемых проводов. Табл. 2–4 построены при следующих условиях:

— температура окружающей среды равна минус 20 °С;

— допустимые токи вычислены на основе уравнений (1), (2) или (5) при данных, представленных в табл. 1, но без учета солнечной радиации.

Выбор низкой температуры воздуха обусловлен тем, что это соответствует расширению рабочего диапазона температур проводов. В результате различия между точным и упрощенным методами становятся более выраженными.

Данные в табл. 5 получены при справочном значении допустимого тока с учетом поправочного коэффициента на температуру окружающей среды [16]. При этом температура окружающей среды принята на минимальном уровне – 5 °С, включенном в таблицу поправочных коэффициентов [16].

Ток нагрузки  $I$  выражен в долях от допустимого тока. Нижний индекс «г» у температуры и потерь активной мощности обозначает точное значение, вычисленное по уравнениям (1), (2) и (5). Индекс «упр» соответствует упрощенным формулам (6)–(8). У внешней температуры изолированного провода дополнительный индекс не указывается, так как

Результаты сравнения потерь мощности и температуры проводов АС-240/32 при расчетном допустимом токе

Без учета солнечной радиации								
$I$ , о.е.	Марка	$I_{гон'}$ , А	$\Theta_{пр.м'}$ , °С	$\Theta_{пр.унр'}$ , °С	$\Delta P_{м'}$ , кВт/км	$\Delta P_{унр'}$ , кВт/км	$\varepsilon_{\Delta P'}$ , %	$\varepsilon_{\Theta'}$ , °С
0	АС-240/32	1060	-20,00	-20,00	0,000	0,000	—	0,000
0,2			-17,29	-17,44	13,55	13,54	0,071	0,153
0,4			-8,775	-9,378	56,35	56,20	0,270	0,603
0,6			6,767	5,492	135,6	134,9	0,533	1,275
0,8			31,72	29,98	266,2	264,4	0,658	1,740
1			70,00	70,00	476,2	476,2	0,000	0,000
С учетом солнечной радиации								
0	АС-240/32	1060	-15,63	-20,00	0,000	0,000	—	4,366
0,2			-12,88	-17,44	13,83	13,54	2,076	4,561
0,4			-4,238	-9,378	57,49	56,20	2,251	5,140
0,6			11,52	5,492	138,3	134,9	2,469	6,026
0,8			36,76	29,98	271,3	264,4	2,515	6,774
1			75,31	70,00	484,5	476,2	1,725	5,311

Таблица 3

Результаты сравнения потерь мощности и температуры проводов СИП-3 1×95 при расчетном допустимом токе

Без учета солнечной радиации									
$I$ , о.е.	Марка	$I_{гон'}$ , А	$\Theta_{внеш'}$ , °С	$\Theta_{пр.м'}$ , °С	$\Theta_{пр.унр'}$ , °С	$\Delta P_{м'}$ , кВт/км	$\Delta P_{унр'}$ , кВт/км	$\varepsilon_{\Delta P'}$ , %	$\varepsilon_{\Theta'}$ , °С
0	СИП-3 1×95	544,7	-20,00	-20,00	-20,00	0,000	0,000	—	0,000
0,2			-17,40	-16,89	-17,06	11,04	11,03	0,079	0,171
0,4			-9,175	-7,045	-7,733	46,17	46,03	0,305	0,687
0,6			6,062	11,24	9,748	112,3	111,6	0,613	1,495
0,8			31,13	41,48	39,34	224,4	222,7	0,780	2,136
1			70,96	90,00	90,00	412,7	412,7	0,000	0,000
С учетом солнечной радиации									
0	СИП-3 1×95	544,7	-14,29	-14,29	-20,00	0,000	0,000	—	5,708
0,2			-11,64	-11,12	-17,06	11,33	11,03	2,684	5,943
0,4			-3,265	-1,079	-7,733	47,39	46,03	2,874	6,654
0,6			12,23	17,54	9,748	115,2	111,6	3,116	7,792
0,8			37,62	48,23	39,34	229,9	222,7	3,164	8,885
1			77,74	97,20	90,00	421,9	412,7	2,184	7,202

Результаты сравнения потерь мощности и температуры проводов ACCR-405-T16 при расчетном допустимом токе

Без учета солнечной радиации								
$I$ , о.е.	Марка	$I_{\text{дон}}'$ , А	$\Theta_{\text{пр.м}'}$ , °C	$\Theta_{\text{пр.упр}'}$ , °C	$\Delta P_{\text{м}'}$ , кВт/км	$\Delta P_{\text{упр}'}$ , кВт/км	$\varepsilon_{\Delta P}'$ , %	$\varepsilon_{\Theta}'$ , °C
0	ACCR-405-T16	1370	-20,00	-20,00	0,000	0,000	—	0,000
0,2			-14,54	-15,49	26,11	25,99	0,435	0,949
0,4			3,409	-0,722	113,0	111,0	1,751	4,131
0,6			39,34	28,92	293,0	281,8	3,833	10,42
0,8			104,4	85,93	645,6	610,2	5,492	18,51
1			210,0	210,0	1325	1325	0,000	0,000
С учетом солнечной радиации								
0	ACCR-405-T16	1370	-15,75	-20,00	0,000	0,000	—	4,254
0,2			-10,20	-15,49	26,62	25,99	2,377	5,286
0,4			7,998	-0,722	115,2	111,0	3,625	8,720
0,6			44,33	28,92	298,4	281,8	5,564	15,41
0,8			109,7	85,93	655,7	610,2	6,950	23,79
1			214,7	210,0	1339	1325	1,055	4,720

Таблица 5

Результаты сравнения потерь мощности и температуры проводов AC-240/32 при справочном допустимом токе

Без учета солнечной радиации								
$I$ , о.е.	Марка	$I_{\text{дон}}'$ , А	$\Theta_{\text{пр.т}'}$ , °C	$\Theta_{\text{пр.уупр}'}$ , °C	$\Delta P_{\text{т}'}$ , кВт/км	$\Delta P_{\text{уупр}'}$ , кВт/км	$\varepsilon_{\Delta P}'$ , %	$\varepsilon_{\Theta}'$ , °C
0	AC-240/32	780,5	-5,000	-5,000	0,000	0,000	—	0,000
0,2			-3,427	-2,721	7,825	7,849	0,308	0,706
0,4			1,405	4,398	31,96	32,37	1,280	2,994
0,6			9,851	17,30	74,51	76,79	3,071	7,446
0,8			22,55	37,91	139,4	147,8	6,019	15,35
1			40,51	70,00	233,1	258,3	10,80	29,49
С учетом солнечной радиации								
0	AC-240/32	780,5	-0,619	-5,000	0,000	0,000	—	4,381
0,2			0,976	-2,721	7,975	7,849	1,583	3,697
0,4			5,872	4,398	32,57	32,37	0,618	1,474
0,6			14,43	17,30	75,91	76,79	1,162	2,870
0,8			27,28	37,91	141,0	147,8	4,092	10,63
1			45,41	70,00	237,3	258,3	8,847	24,59

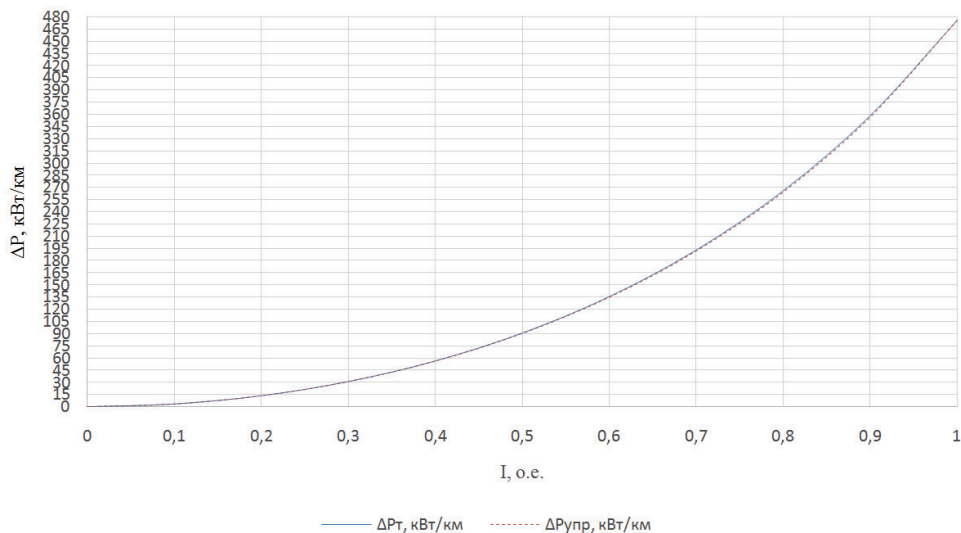


Рис. 1. Зависимости потерь активной мощности от тока нагрузки для проводов АС-240/32 при расчетном допустимом токе без учета солнечной радиации

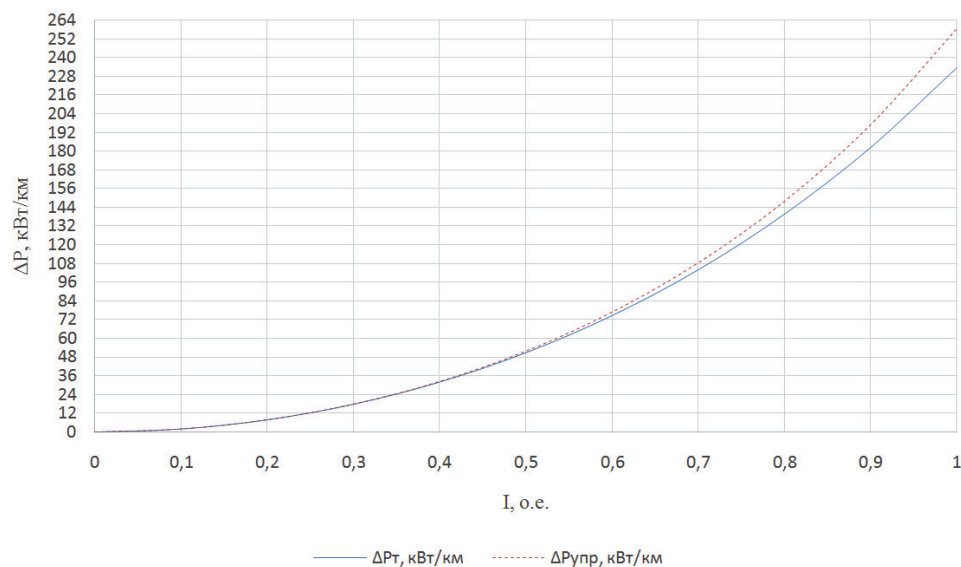


Рис. 2. Зависимости потерь активной мощности от тока нагрузки для проводов АССР-405-T16 при расчетном допустимом токе с учетом солнечной радиации

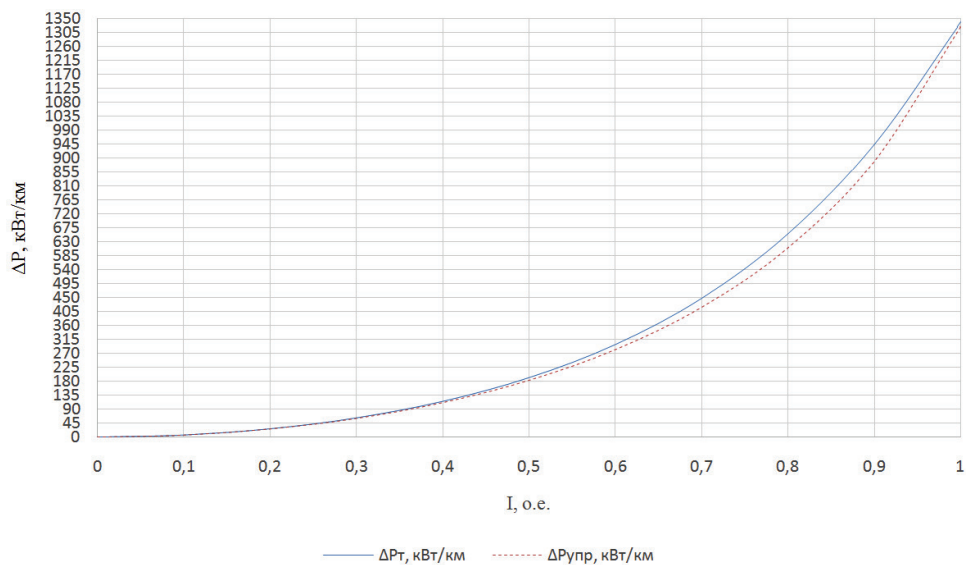


Рис. 3. Зависимости потерь активной мощности от тока нагрузки для проводов АС-240/32 при справочном допустимом токе без учета солнечной радиации

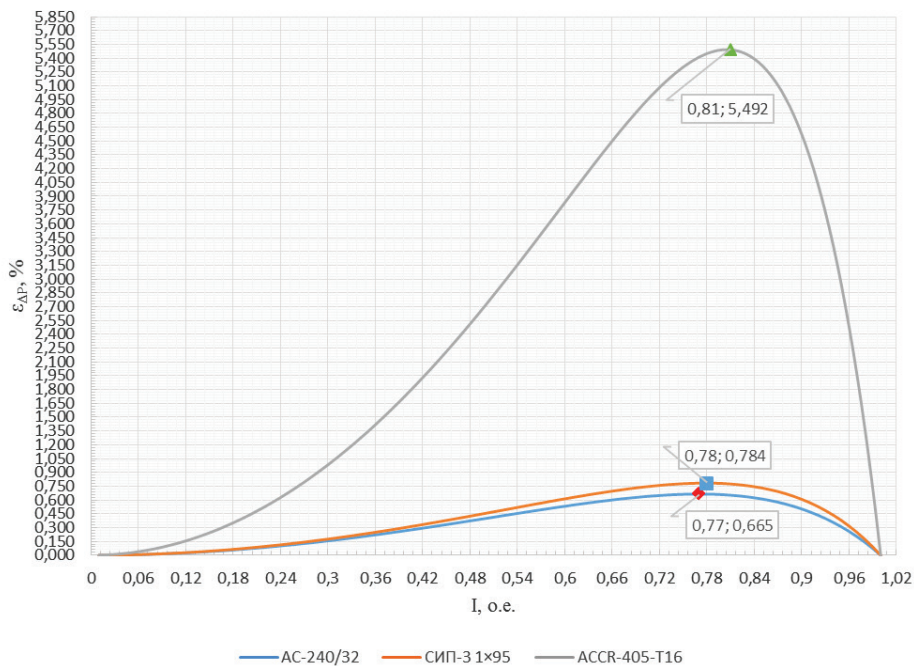


Рис. 4. Погрешности расчета потерь мощности по упрощенным формулам при расчетном допустимом токе без учета солнечной радиации

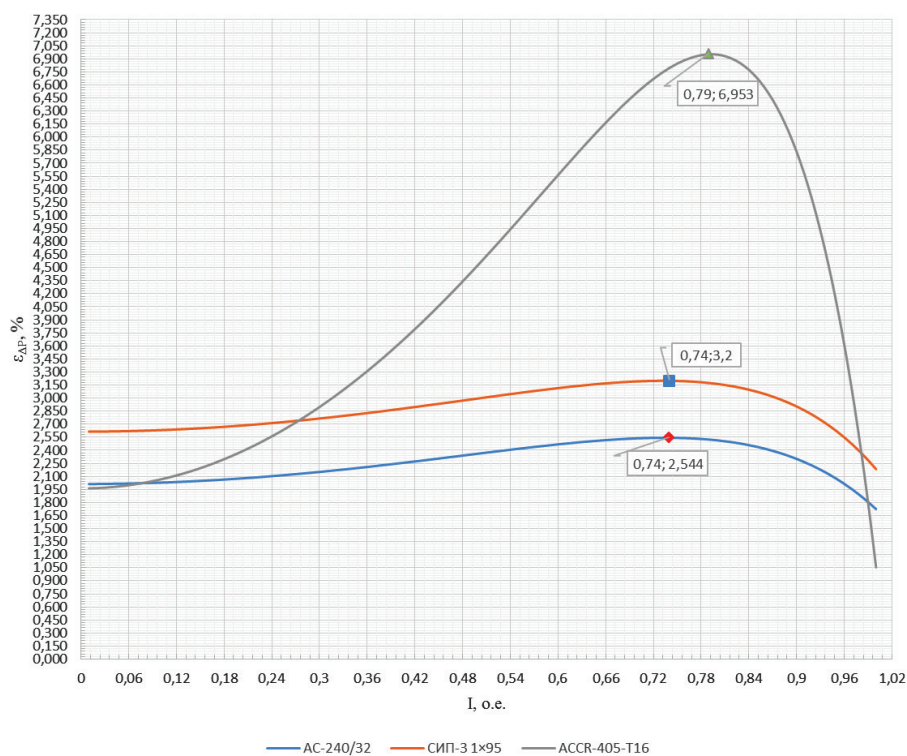


Рис. 5. Погрешности расчета потерь мощности по упрощенным формулам при расчетном допустимом токе с учетом солнечной радиации

она может быть вычислена только по полной модели. В каждой таблице приведены также относительные погрешности расчета потерь мощности  $\epsilon_{\Delta P}$  по упрощенным формулам по сравнению с полной моделью (1), (2) или (5), и абсолютные погрешности расчета температуры провода  $\epsilon_{\Theta}$  теми же методами:

$$\epsilon_{\Delta P} = \left| \frac{\Delta P_m - \Delta P_{упр}}{\Delta P_m} \right| 100 \%, \quad \epsilon_{\Theta} = \left| \Theta_{np.m} - \Theta_{np.упр} \right| \quad (12)$$

Видно, что при расчетном допустимом токе упрощенная формула дает наибольшую точность для проводов АС-240/32; зависимости потерь от тока нагрузки без учета солнечной радиации, построенные по точным и упрощенным формулам, в масштабе рис. 1 практически не различаются. Для изолированных проводов погрешность несколько возрастает, но это увеличение незначительно. С практической точки зрения погрешность расчета потерь по упрощенным формулам становится суще-

ственной только для проводов АССР, где она может превышать 5 %. Указанная зависимость погрешности от марки провода обусловлена возрастанием диапазона рабочих температур: у проводов АС при принятых данных он составляет 90 °С, у СИП — 110 °С, а у АССР — 230 °С.

Погрешность расчета потерь мощности носит условно систематический характер: упрощенный метод дает более низкие значения температуры и потерь по сравнению с точными уравнениями. Однако постоянную составляющую погрешности без учета солнечной радиации выделить невозможно, так как при нулевом и при допустимом токе погрешность обращается в ноль.

Солнечная радиация при принятых значениях ее интенсивности приводит к дополнительному нагреву проводов на 4–7 °С и к увеличению потерь активной мощности примерно на 2 % (табл. 2–4). В результате различие между точным и упрощенным методами усиливается с появлением постоянной составляющей погрешности.

При использовании расчетного допустимого тока зависимости погрешности от тока нагрузки имеют четко выраженный максимум как с учетом, так и без учета солнечной радиации. Точки максимума выделены на рис. 4 и 5 с указанием абсцисс и ординат. Для всех случаев максимумы наблюдаются примерно в одной и той же области — около 75–80 % от допустимого тока. При меньших токах погрешности снижаются за счет того, что температура проводов уменьшается и тепловое изменение сопротивлений становится менее значительным. Снижение погрешностей при возрастании тока сверх 80 % от допустимого обусловлено тем, что коэффициент  $A$  в упрощенной формуле выбран из условия равенства потерь при допустимом токе по точному и упрощенному методу. Поэтому при допустимом токе погрешность примерно соответствует постоянной составляющей, обусловленной солнечным нагревом, а без учета солнечной радиации эта погрешность равна нулю.

Рассмотренные закономерности в полной мере справедливы лишь для случая, когда допустимый ток вычисляется на основе полного уравнения теплового баланса. Если в расчетах используется справочное значение допустимого тока, не вполне соответствующее всем реальным условиям охлаждения, то погрешность при использовании упрощенной формулы значительно возрастает (табл. 5, рис. 3). Поскольку справочные значения допустимых токов почти всегда меньше фактических, то упрощенная формула в этом случае дает, наоборот, завышенные значения потерь мощности. Соответствующие погрешности могут превышать 10 %.

**Заключение.** Результаты сравнения точного и упрощенного методов расчета потерь активной мощности в линиях электропередачи с учетом температуры позволяют сделать следующие выводы:

1. В стандартных неизолированных проводах АС, а также в изолированных проводах СИП-3 погрешность расчета потерь упрощенным методом по сравнению с точными уравнениями не превышает 3,2 %. При отсутствии солнечной радиации погрешность расчета потерь в этих проводах становится менее 1 %.

2. Влияние солнечной радиации увеличивает потери примерно на 2 % независимо от нагрузки. Это следует считать максимальной оценкой, так как принятые при расчетах условия примерно соответствуют максимально возможной среднегодовой

солнечной радиации. Следовательно, этот фактор почти не оказывает влияния на эффективность мероприятий по снижению потерь энергии и поэтому почти во всех случаях может быть исключен из расчетов.

3. В высокотемпературных проводах погрешность может несколько превышать 5 %; это наблюдается в интервале нагрузок примерно 70–90 % от допустимого тока.

Сделанные выводы справедливы для стационарного теплового режима и при условии, что допустимый ток, используемый в упрощенных формулах, полностью соответствует точному уравнению теплового баланса. Снижение точности, с которой задается допустимый ток, приводит к значительному увеличению погрешности расчета потерь (в проводах АС примерно до 10 %).

Разработанная методика может быть использована в задачах расчета и снижения потерь энергии в проводах типа АС и СИП, а также в большинстве случаев в проводах повышенной пропускной способности. Она позволяет учесть температурную зависимость сопротивления и в то же время избежать громоздких расчетов, характерных для решения уравнений теплового баланса. Упрощенная формула для потерь мощности имеет четкий физический смысл и требует только двух дополнительных данных по сравнению с расчетами без учета температуры: допустимый ток и температуру окружающей среды.

#### Библиографический список

1. Справочник по проектированию электрических сетей / Под ред. Д. Л. Файбисовича. 4-е изд., перераб. и доп. М.: ЭНАС, 2012. 376 с. ISBN 978-5-4248-0049-8.
2. Поспелов Г. Е., Ершевич В. В. Влияние температуры проводов на потери электроэнергии в активных сопротивлениях проводов воздушных линий электропередачи // Электричество. 1973. № 10. С. 81–83.
3. Гиршин С. С., Бубенчиков А. А., Петрова Е. В., Горюнов В. Н. Математическая модель расчета потерь мощности в изолированных проводах с учетом температуры // Омский научный вестник. 2009. № 3 (83). С. 176–179.
4. Бигун А. Я., Гиршин С. С., Петрова Е. В., Горюнов В. Н. 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.
5. Шведов Г. В., Азаров А. Н. Оценка влияния метеоусловий на годовые нагрузочные потери электроэнергии в проводах воздушных линий // Электричество. 2016. № 2. С. 11–18.
6. Воротицкий В. Э., Туркина О. В. Оценка погрешностей расчета переменных потерь электроэнергии в ВЛ из-за неучета метеоусловий // Электрические станции. 2008. № 10. С. 42–49.
7. Goryunov V. N., Girshin S. S., Kuznetsov E. A. [et al.]. A mathematical model of steady-state thermal regime of insulated overhead line conductors // 2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (E3E), June 7–10, 2016. Florence, 2016. P. 7555481.
8. Герасименко А. А., Тимофеев Г. С., Тихонович А. В. Учёт схемно-режимных и атмосферных факторов при расчёте технических потерь электроэнергии в распределительных сетях // Журнал СФУ. Техника и технологии. 2008. Т. 1, № 2. С. 188–206.
9. 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.



10. Гиршин С. С., Петрова Е. В., Суриков В. И. Расчет и анализ потерь активной мощности в элементах сети на основе аналитических выражений с учетом температурной зависимости сопротивлений // Омский научный вестник. 2013. № 1 (117). С. 152–156.

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

12. Самонесущий изолированный провод СИП-3 (аналог SAX) // Уралэнергосила. URL: <http://uralenergy.ru/catalog/r-64.html> (дата обращения: 17.09.2018).

13. Композитный провод ЗМ™ ACCR. Справочник проектировщика. URL: [http://solutions.3mrussia.ru/3MContentRetrievalAPI/BlobServlet?locale=ru\\_RU&lmd=1292916332000&assetId=1273673769211&assetType=MMM\\_Image&blobAttribute=ImageFile](http://solutions.3mrussia.ru/3MContentRetrievalAPI/BlobServlet?locale=ru_RU&lmd=1292916332000&assetId=1273673769211&assetType=MMM_Image&blobAttribute=ImageFile) (дата обращения: 17.09.2018).

14. Хромов С. П., Петросянц М. А. Метеорология и климатология. 8-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГУ, 2012. 584 с. ISBN 978-5-211-06334-1.

15. Электротехнический справочник. В 4 т. / Под общ. ред. В. Г. Герасимова, А. Ф. Дьякова, Н. Ф. Ильинского [и др.]. М.: МЭИ, 1995. Т. 1. 440 с.

16. Правила устройства электроустановок. М.: КНОРУС, 2015. 488 с. ISBN 978-5-406-04462-9.

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

SPIN-код: 1125-1521

AuthorID (РИНЦ): 297584

AuthorID (SCOPUS): 57190579930

**ТРОЦЕНКО Владислав Михайлович**, аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

SPIN-код: 3958-5882

AuthorID (РИНЦ): 889516

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

SPIN-код: 2765-2945

AuthorID (РИНЦ): 302109

AuthorID (SCOPUS): 7003455231

**КРОПОТИН Олег Витальевич**, доктор технических наук, доцент (Россия), декан факультета довузовской подготовки, помощник проректора по учебной работе по профориентации.

SPIN-код: 4218-4900

AuthorID (РИНЦ): 118225

ORCID: 0000-0002-6620-9945

AuthorID (SCOPUS): 6505835545

ResearcherID: H-4616-2013

**ШЕПЕЛЕВ Александр Олегович**, аспирант, ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

SPIN-код: 8418-9944

AuthorID (РИНЦ): 827023

**ТКАЧЕНКО Всеволод Андреевич**, магистрант гр. ЭЭМ-171 факультета элитного образования и магистратуры; инженер кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

SPIN-код: 5200-0062

AuthorID (РИНЦ): 939477

Адрес для переписки: alexshepelev93@gmail.com

#### Для цитирования

Гиршин С. С., Троценко В. М., Горюнов В. Н., Кропотин О. В., Шепелев А. О., Ткаченко В. А. Упрощенная формула для нагрузочных потерь активной мощности в линиях электропередачи с учетом температуры // Омский научный вестник. 2018. № 6 (162). С. 41–49. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-41-49.

Статья поступила в редакцию 26.10.2018 г.

© С. С. Гиршин, В. М. Троценко, В. Н. Горюнов,

О. В. Кропотин, А. О. Шепелев, В. А. Ткаченко