

Анализ систематической погрешности измерения потерь на корону и в проводах в режиме реального времени

ГАДЖИЕВ М.Г.

Проведен анализ погрешности алгоритма расчета текущих потерь на корону и в проводах от токов нагрузки. Рассматриваемый алгоритм основан на компенсации систематической и случайной погрешностей измерения потерь и заложен в программный комплекс «Универсальный измерительный комплекс». Дана оценка погрешности определения нагрузочных потерь, потерь на корону в хорошую погоду и потерь на корону в плохую погоду. При этом в погрешности нагрузочных потерь анализируется инструментальная и методическая составляющие.

Ключевые слова: воздушные линии, потери на корону, нагрузочные потери, универсальный измерительный комплекс, погрешность

Создание интеллектуальных электрических сетей невозможно без полноценного и целенаправленного мониторинга их состояния. При управлении электроэнергетическими системами особое внимание уделяется энергосбережению и надежности электроснабжения. Одним из вариантов решения вопроса энергосбережения является оптимизация режимов электроэнергетических систем по напряжению и потокам реактивной мощности.

Потери в линиях электропередачи состоят из нагрузочных потерь и потерь на корону, при этом обе указанные составляющие зависят от уровня напряжения: нагрузочные потери обратно пропорциональны квадрату напряжения, а потери на корону пропорциональны напряжению примерно в пятой степени [1]. Таким образом, оптимальный уровень напряжения в узлах энергосистемы зависит от соотношения потерь на корону и нагрузочных потерь в линиях. Если в хорошую погоду нагрузочные потери преобладают над потерями на корону, то при плохой погоде (снег, дождь, изморозь) потери на корону увеличиваются на 1–2 порядка. Вот почему создание системы непрерывного измерения потерь на корону в линиях является необходимой базой для оптимизации режима.

При расчетах установившихся режимов электроэнергетических систем и их оптимизации в условиях изменяющихся нагрузок нагрузочные потери в проводах учитываются по данным оперативного информационного комплекса (ОИК). Потери на корону в реальном времени либо не учитываются, либо учитываются приближенно. Это связано с тем, что, во-первых, «руководящие указания» [2]

The errors with which the algorithm for calculating current corona losses and losses in wires due to load currents determines these parameters are analyzed. The considered algorithm, central to which is compensation of systematic and random loss measurement errors, is laid down in the Universal Measurement Complex software system. The errors with which the algorithm determines load losses and corona losses in fair weather and corona losses in bad weather are estimated. The errors of determining load losses are analyzed separately for the instrumental and methodical components.

Key words: overhead lines, corona losses, load losses, universal measurement complex, error

позволяют рассчитывать не текущие потери, а среднегодовые потери на корону. Во-вторых, тип погоды на заданной линии может определяться только по данным метеостанций, которые обычно находятся вдали от линий, что не позволяет определить начало появления значительных потерь на корону и длину линии, находящуюся в условиях той или иной погоды. В-третьих, внутри данного вида погоды потери на корону могут изменяться в широком диапазоне. Все это делает расчет оптимизации сети с учетом короны по [2] недопустимым.

Собственником воздушных линий сверхвысокого напряжения (ВЛ СВН) является ОАО «ФСК ЕЭС» (далее ФСК). В компании уделяется большое внимание вопросу расчета потерь на корону: разработан и внедрен универсальный измерительный комплекс (далее УИК), который предназначен для определения текущих значений потерь в проводах от тока нагрузки и на корону ВЛ. Данные телеизмерений ОИК использует УИК и путем вычитания из активной мощности передающего конца линии активной мощности её приёмного конца с учетом поправки определяет указанные потери. Алгоритм, заложенный в УИК, основан на компенсации систематической и случайной погрешностей измерения потерь. В настоящее время в УИК введено 35 линий 330–750 кВ, для которых в течение года велись непрерывные измерения потерь на корону [3]. Для того чтобы понять, насколько точно УИК определяет текущие потери на корону, проанализируем погрешность указанного метода.

Пусть по концам ВЛ измеряются активные мощности P_1 с погрешностью DP_1 и P_2 с погрешно-

стью DP_2 , тогда истинные значения P_1 и P_2 будут равны:

$$P_{1ист} = P_1 + DP_1 \text{ и } P_{2ист} = P_2 + DP_2, \quad (1)$$

следовательно потери в ВЛ можно определить как

$$P_{1ист} - P_{2ист} = P_1 - P_2 - \Pi, \quad (2)$$

где $\Pi = DP_1 - DP_2$ – погрешность системы измерения потерь, которая содержит систематическую и случайную составляющие.

Потери в ВЛ складываются из потерь в проводах от токов нагрузки и потерь на корону с учетом токов утечки по проводам, поэтому

$$P_1 - P_2 - \Pi = P_{\Pi} + P_{\kappa}. \quad (3)$$

Тогда погрешность определения потерь равна

$$\Pi = P_1 - P_2 - P_{\Pi} - P_{\kappa}. \quad (4)$$

Уменьшить случайную составляющую Π можно путем усреднения большого числа данных измерений за некоторый период времени: в УИК усредняется 120 пятисекундных значений за 10 мин. Тогда систематическая составляющая погрешности измерения потерь будет равна

$$\bar{\Pi} = \bar{P}_1 - \bar{P}_2 - \bar{P}_{\Pi} - \bar{P}_{\kappa}, \quad (5)$$

откуда видно, что точность определения $\bar{\Pi}$ зависит от погрешности определения \bar{P}_{Π} и \bar{P}_{κ} . Потери от токов нагрузки \bar{P}_{Π} можно определить по значениям U, P, Q , а потери на корону \bar{P}_{κ} можно рассчитать только для условий хорошей погоды, поскольку потери на корону в хорошую погоду $\bar{P}_{\kappa,х}$ мало изменяются, невелики и могут быть достаточно точно рассчитаны. Поэтому в хорошую погоду для i -го номера десятиминутного усреднения

$$\Pi_i = \bar{P}_{1i} - \bar{P}_{2i} - \bar{P}_{\Pi i} - \bar{P}_{\kappa,xi}. \quad (6)$$

Погрешность расчета нагрузочных потерь можно разделить на две составляющие – методическую и инструментальную погрешность.

Для определения методической погрешности сравним несколько разных способов определения нагрузочных потерь. Наиболее точным является расчет с учетом волновых свойств ВЛ. Для определения потерь воспользуемся точной и упрощенной формулами, выведенными в [4]. Точная формула определения нагрузочных потерь и потерь на корону в хорошую погоду имеет вид:

$$P_{\Pi} = \frac{U^2 \hat{e}}{z_B \hat{e}} b_0 l (1 + P_{*2}^2 + Q_{*2}^2) + 0,5 \operatorname{tgj}_z (1 - P_{*2}^2 - Q_{*2}^2) \sin 2l + P_{*2} \frac{r_0 g_0 (1^2 + \sin^2 l)}{x_0 b_0} + 2Q_{*2} \operatorname{tgj}_z \sin^2 l \dot{U} \dot{U} \quad (7)$$

где

$$Q_{*2} = - \operatorname{ctgl} + \sqrt{\frac{\frac{\partial K}{\partial \sin l} \frac{\partial^2}{\partial} - \frac{\partial}{\partial \sin^2 l} + \frac{b_0 l}{\sin^2 l} - \operatorname{tgj}_z \operatorname{ctgl} \frac{\partial^2}{\partial}}$$

– реактивная мощность в конце линии, отнесенная к натуральной мощности ВЛ; $K = U_1 / U_2$ – перепад напряжения между началом и концом ВЛ; r_0, x_0 – удельное активное и реактивное сопротивление линии; g_0, b_0 – удельная активная и емкостная проводимость линии;

$z_B = 4 \sqrt{\frac{r_0^2 + x_0^2}{g_0^2 + b_0^2}}$ – волновое сопротивление ВЛ; $j_z = 0,5 \operatorname{arctg} \frac{\frac{\partial}{\partial} r_0 x_0 - r_0 b_0 \frac{\partial}{\partial}}{r_0 g_0 + x_0 b_0 \frac{\partial}{\partial}}$ – фазный угол волнового сопротивления ВЛ; $a_0 \gg \sqrt{x_0 b_0}$ – коэффициент изменения фазы электромагнитной волны для идеализированной линии;

$b_0 \gg a_0 \operatorname{tg} \frac{\partial}{\partial} 0,5 \operatorname{arctg} \frac{\partial}{\partial} + \frac{g_0 \frac{\partial}{\partial}}{b_0 \frac{\partial}{\partial}}$ – коэффициент затухания волны с учетом рассеивания энергии при нагреве и коронировании проводов; $l = a_0 l$ – волновая длина ВЛ; l – длина линии; $P_{*2} = P_2 / P_{нат}$;

$P_{нат} = U^2 / z_B$ – натуральная мощность ВЛ; P_2 – активная мощность в конце линии, отнесенная к натуральной мощности ВЛ (отн. ед.).

Так как в формуле (6) значение $\bar{P}_{\Pi i}$ определяется в хорошую погоду, когда значения потерь на корону невелики, то (7) можно упростить, считая $g_0 = 0$. В этом случае

$$P_{\Pi} = \frac{U^2 \hat{e}}{z_B \hat{e}} b_0 l (1 + P_{*2}^2 + Q_{*2}^2) + 0,5 \operatorname{tgj}_z (1 - P_{*2}^2 - Q_{*2}^2) \sin 2l + 2Q_{*2} \operatorname{tgj}_z \sin^2 l \dot{U} \dot{U} \quad (8)$$

Согласно [4] этой формулой следует пользоваться при длине ВЛ более 400 км. Для линий небольшой длины нагрузочные потери можно определить по данным одного из концов линии:

$$P_{\Pi i} = K \frac{\frac{\partial}{\partial} P_i^2 + Q_i^2 \frac{\partial}{\partial}}{U_i^2 \frac{\partial}{\partial}} \quad (9)$$

В УИК для снижения погрешности нагрузочные потери в линии определяются как среднее арифметическое значение потерь, определенных по данным измерений обоих концов линии:

$$P_{\Pi} = 0,5(P_{\Pi 1} + P_{\Pi 2}) \quad (10)$$

или

$$P_{\Pi} = 0,5 \left(R \frac{P_1^2}{U_1^2} + \frac{P_2^2}{U_2^2} + \frac{Q_1^2}{U_1^2} + \frac{Q_2^2}{U_2^2} + \frac{Q_1 Q_2}{U_1 U_2} \right) \quad (11)$$

Значения P_1 и P_2 близки, но значения Q_1 и Q_2 могут сильно отличаться и даже иметь разные знаки. Рассмотрим, как можно уточнить значения потерь в проводах от реактивных мощностей в данном случае. Если предположить, что $(P_1^2 / U_1^2) \approx (P_2^2 / U_2^2)$, то с достаточной степенью точности потери можно рассчитать по следующей формуле:

$$P_{\Pi} = R \frac{P_1^2}{U_1^2} + 0,5 \left(\frac{Q_1^2}{U_1^2} + \frac{Q_2^2}{U_2^2} + \frac{Q_1 Q_2}{U_1 U_2} \right) \quad (12)$$

Так как реактивная мощность по ВЛ СВН обычно не передается, то она невелика и ее знаки по концам ВЛ могут быть разными, что определяется зарядными токами линии. Если принять, что реактивная мощность по длине ВЛ распределяется линейно, как показано на рис. 1, то на элементе длины dl потери от реактивного тока будут равны

$$dP_{\Pi Ql} = \frac{R Q_l^2}{L U^2} dl,$$

где L – полная длина линии.

Зависимость $Q(l)$ определяется соотношением

$$Q_l = Q_1 + \frac{Q_2 - Q_1}{L} l,$$

тогда, считая $U = \text{const}$, получим:

$$\begin{aligned} P_{\Pi Ql} &= \frac{R}{L U^2} \int_0^L \left(Q_1 + \frac{Q_2 - Q_1}{L} l \right)^2 dl = \\ &= \frac{R}{L U^2} \int_0^L \left(Q_1^2 + \frac{(Q_2 - Q_1)^2}{L^2} l^2 + 2 Q_1 \frac{Q_2 - Q_1}{L} l \right) dl = \\ &= \frac{R}{L U^2} \left[Q_1^2 l + \frac{(Q_2 - Q_1)^2}{L^2} \frac{l^3}{3} + 2 Q_1 \frac{Q_2 - Q_1}{L} \frac{l^2}{2} \right]_0^L = \\ &= \frac{R}{U^2} \left[Q_1^2 L + \frac{1}{3} (Q_2^2 + Q_1^2 - 2 Q_1 Q_2) L + Q_1 Q_2 L - Q_1^2 L \right] = \\ &= \frac{R}{3 U^2} [Q_1^2 Q_2^2 + Q_1 Q_2 L]. \end{aligned}$$

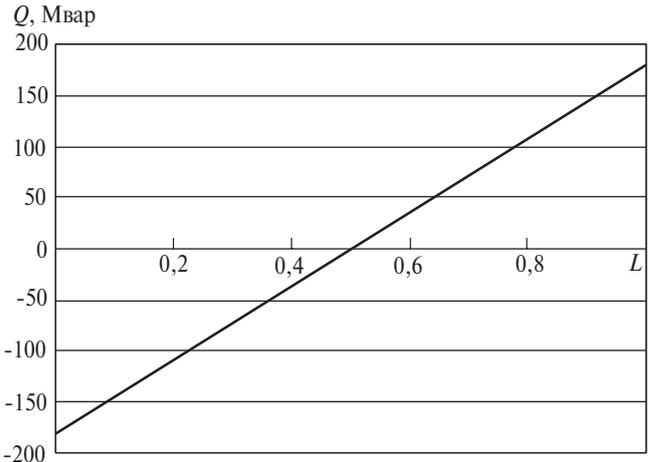


Рис. 1. Распределение реактивной мощности вдоль линий СВН

В этом случае суммарные нагрузочные потери определяются формулой

$$P_{\Pi l} = R \frac{P_1^2}{U_1^2} + \frac{1}{3 U^2} (Q_1^2 + Q_2^2 + Q_1 Q_2) \quad (13)$$

где $U = (U_1 + U_2) / 2$.

Рассчитаем нагрузочные потери для конкретной линии с параметрами: $U_{\text{вл}}=500$ кВ, АСЗ 330/43; $L_{\text{вл1}}=300$ км и $L_{\text{вл2}}=600$ км; $R_{\text{вл1}}= L_{\text{вл1}} 0,0578/3 = 300 \cdot 0,0578/3 = 5,78$ Ом; $R_{\text{вл2}}= L_{\text{вл2}} 0,0578/3 = 600 \cdot 0,0578/3 = 11,56$ Ом, в зависимости от передаваемой мощности.

Результаты расчетов приведены на рис. 2. Данные рис. 2 позволяют найти методическую погрешность определения нагрузочных потерь при использовании приближенных формул (12) и (13) как $DP_{\Pi,м} = DP_{\Pi(8)} - DP_{\Pi(12)(13)}$.

Из рис. 3 следует, что методическая погрешность определения нагрузочных потерь по (12) и (13) зависит как от значения передаваемой мощности, так и от длины линии. Очевидно, что нагрузочные потери в ВЛ следует считать по формуле (8), учитывающей волновые параметры линии.

Теперь можно рассчитать инструментальную погрешность определения P_{Π} и $P_{к.к}$. Для ее определения здесь и далее используется формула полного дифференциала функции $u = f(x, y, z)$:

$$Du = \frac{\partial u}{\partial x} Dx + \frac{\partial u}{\partial y} Dy + \frac{\partial u}{\partial z} Dz,$$

где D – знак погрешности; $\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial u}{\partial z}$ – частные производные u .

Определим погрешность расчета потерь от нагрузки DP_{Π} с помощью формулы (9), используемую в УИК:

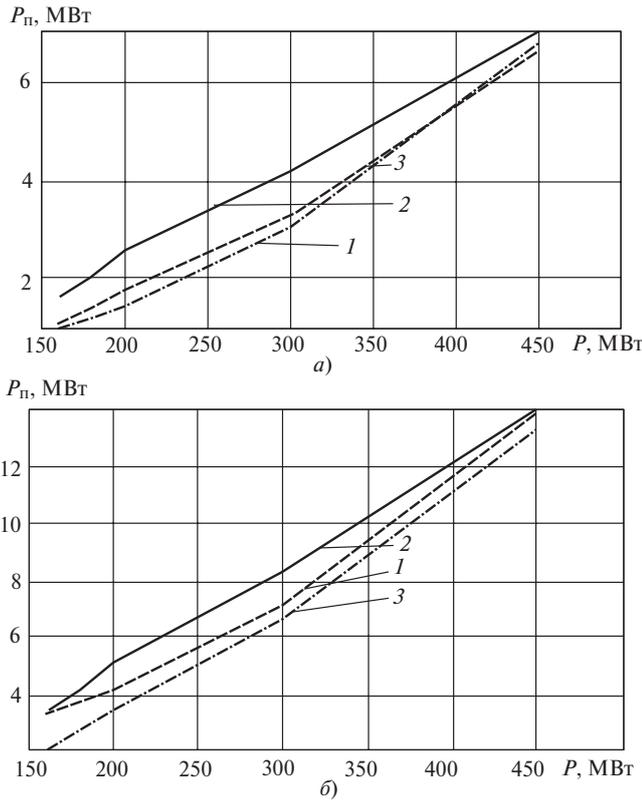


Рис. 2. Результаты расчета потерь в проводах в зависимости от передаваемой мощности для линии: а – длиной 300 км; б – 600 км: 1 – расчет по (8); 2 – по (12); 3 – по (13)

$$DP_{\Pi} = R \frac{2P}{U^2} DP + \frac{2Q}{U^2} DQ - 2R \frac{P^2 + Q^2}{U^3} DU + \frac{P^2 + Q^2}{U^2} DR, \quad (14)$$

где, DP , DQ – погрешности определения активной и реактивной мощности:

$$DP = \frac{\partial}{\partial U} \frac{DU}{U} + \frac{\partial}{\partial I} \frac{DI}{I} - \operatorname{tg} \phi \frac{\partial}{\partial \phi} \frac{D\phi}{\phi} + \frac{DP_{\text{прб}}}{P} \frac{\partial}{\partial P} \frac{DP_{\text{прб}}}{P};$$

$$DQ = \frac{\partial}{\partial U} \frac{DU}{U} + \frac{\partial}{\partial I} \frac{DI}{I} - \operatorname{ctg} \phi \frac{\partial}{\partial \phi} \frac{D\phi}{\phi} + \frac{DQ_{\text{прб}}}{Q} \frac{\partial}{\partial Q} \frac{DQ_{\text{прб}}}{Q};$$

$$\frac{DP_{\text{прб}}}{P} 100\% = \frac{DQ_{\text{прб}}}{Q} 100\% \gg 0,2\%$$

– погрешность преобразователей активной и реактивной мощности; $R = R_{20} [1 + 0,004(t_{\Pi} - 20)]$; $DR = 0,004 R_{20} D t_{\Pi}$ – погрешность определения сопротивления проводов ВЛ; DU – амплитудная погрешность трансформатора напряжения (ТН); DI – амплитудная погрешность трансформатора тока (ТТ); $D\phi = D\phi_I - D\phi_U$ – угловая погрешность, определяемая угловыми погрешностями ТТ и ТН; $D t_{\Pi}$ – погрешность определения температуры провода на трассе ВЛ; U, I, ϕ – измеренные ТН и ТТ

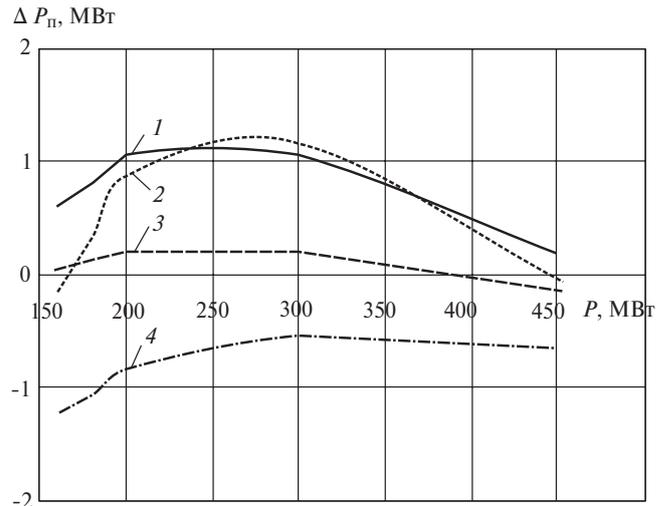


Рис. 3. Методическая погрешность определения нагрузочных потерь при использовании формул (12) и (13) в зависимости от передаваемой мощности: 1, 2 – для ВЛ 300 км; 3, 4 – 600 км; 1, 3 – расчет по формуле (12); 2, 4 – по (15)

значения напряжения, тока и фазового угла; $\operatorname{tg} \phi = Q/P$.

Если в формуле $R = R_{20} [1 + 0,004(t_{\Pi} - 20)]$ вместо температуры провода использовать температуру окружающей среды, то погрешность определения сопротивления провода может достигать больших значений [5]. Температура провода зависит от многих факторов и, в первую очередь, от протекающего по проводу тока, температуры окружающего воздуха, скорости ветра и уровня солнечной радиации. Мониторинг линии ЕНЭС показал, что их нагрузка в среднем за год составляет примерно 50% натуральной мощности. При нагрузке 50% и менее влияние тока и скорости ветра на температуру и сопротивление провода невелико и им можно пренебречь [5]. Однако систематическая погрешность определяется в периоды хорошей погоды, когда температура воздуха имеет положительные значения. И даже если нагрузка невелика, происходит нагрев проводов солнечной радиацией, что приводит к росту температуры по отношению к температуре воздуха максимум 20 °С [6]. В среднем, значение погрешности определения температуры провода можно принять равным 10 °С.

В соответствии с [7] выражения для расчета погрешности определения активной и реактивной мощности и потерь для различных вариантов загрузки ТТ и ТН имеют вид:

$$DP_{\phi} = \frac{DP}{P} 100\% = DU_{\phi} + DI_{\phi} \operatorname{tg} \phi + DP_{\text{прб}}_{\phi}, \quad \%, \quad (15)$$

$$DQ_{\phi} = \frac{DQ}{Q} 100\% = DU_{\phi} + DI_{\phi} \operatorname{ctg} \phi + DQ_{\text{прб}}_{\phi}, \quad \%, \quad (16)$$

где

$$DU \approx \frac{DU}{U} 100\%; DI \approx \frac{DI}{I} 100\%;$$

$$Dj \approx \frac{Dj}{j} 100\% - \frac{Dj}{j} \frac{U}{I} 100\%; \operatorname{tg} j = \frac{Q}{P};$$

$$DP_{\text{прб}} \approx - \frac{DP_{\text{прб}}}{P} 100\%; DQ_{\text{прб}} \approx \frac{DQ_{\text{прб}}}{Q} 100\%.$$

Погрешность определения нагрузочных потерь (в кВт) равна:

$$DP_{\Pi} \approx \frac{2P_{\text{вл}}}{U^2} \frac{DP_{\text{вл}}}{100\%} + R \frac{2Q_{\text{вл}}}{U^2} \frac{DQ_{\text{вл}}}{100\%} -$$

$$- 2R \frac{P_{\text{вл}}^2 + Q_{\text{вл}}^2}{U^3} \frac{DU}{100\%} + \frac{P_{\text{вл}}^2 + Q_{\text{вл}}^2}{U^2} \frac{DR}{10^3}.$$

Отношение погрешности определения нагрузочных потерь к нагрузочным потерям определится как $DP_{\Pi} = \frac{DP_{\Pi} (\text{кВт})}{P_{\Pi} (\text{кВт})} 100\%$.

$$DP_{\Pi} = \frac{DP_{\Pi} (\text{кВт})}{P_{\Pi} (\text{кВт})} 100\%.$$

Рассчитаем конкретные значения погрешности расчета нагрузочных потерь линии длиной 300 км для различных вариантов загрузки ТН (0, 20%, 50%, 100%), используя характеристики погрешности ТТ и ТН, приведенные в [5], и полагая, что погрешность измерения температуры провода равна 10 °С.

Расчеты показали, что погрешность нагрузочных потерь в проводах не зависит от нагрузки ТН. Из рис. 4 видно, что инструментальная погрешность определения потерь в проводах невелика и при максимальном абсолютном значении 1151 кВт составляет 4% значения потерь мощности в проводах, по отношению к натуральной мощности ВЛ (900 МВт) – 0,0128%.

Расчет потерь на корону в хорошую погоду в соответствии с [1] определяется по формуле:

$$P_{\text{к.х}} = bL \left(0,0735U^2 - 0,275 \frac{U^3}{U_{0\Pi}} + 0,268 \frac{U^4}{U_{0\Pi}^2} \right) \quad (17)$$

где $b = b_1 + b_2 + b_3 \approx 3b_i$ – сумма коэффициентов наклона редуцированных потерь мощности общей короны для фаз 1, 2 и 3, 1/(Ом·м) (если потери мощности на корону $P = j(U)$, то редуцированные потери есть $P/U = y(U)$; $U = U_{\text{л}} \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$ – амплитудное фазное напряжение, В; $U_{0\Pi}$ – начальное напряжение коронного разряда, В;

для $r_{\Pi} < 0,01$ м

$$U_{0\Pi} = \frac{2\pi en r_{\Pi} (0,8 + 0,2k_{\Pi})}{Ck_{\Pi}} 2,4 \times 10^6 \left(1 + \frac{0,108}{(r_{\Pi} d)^{0,38}} \right) \quad (18)$$

для $r_{\Pi} > 0,01$ м

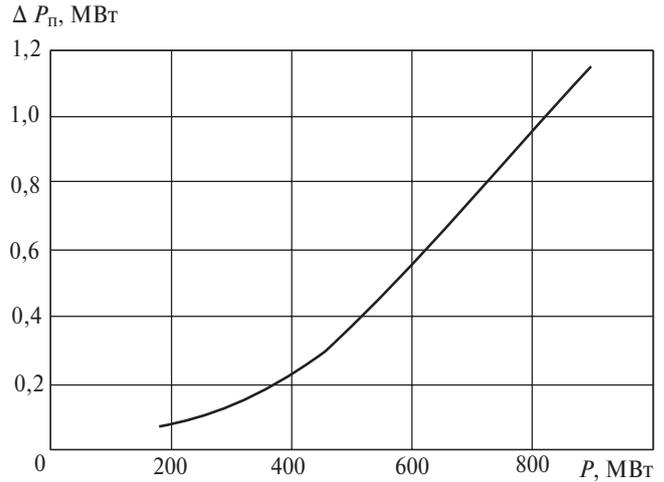


Рис. 4. Результаты расчетов инструментальной погрешности определения нагрузочных потерь в зависимости от передаваемой мощности при различной нагрузке ТН (от 0 до 100%)

$$U_{0\Pi} = \frac{2\pi en r_{\Pi} (0,8 + 0,2k_{\Pi})}{Ck_{\Pi}} 2,4 \times 10^6 \left(1 + \frac{0,108}{(r_{\Pi} d)^{0,38}} \right) \quad (19)$$

$e = 8,85 \times 10^{-12}$ Ф/м; n – число проводов в фазе; r_{Π} – радиус провода, м; C – рабочая ёмкость фазы ($12,3 \times 10^{-12}$ для ВЛ 500кВ), Ф/м; $k_{\Pi} = 1 + (n-1) \frac{r_{\Pi}}{r_p}$ –

коэффициент неравномерности поля на поверхности провода; r_p – радиус расщепления проводов фазы, м; $d = 0,386p / (273 + t)$ – относительная плотность воздуха, определяемая по температуре t (°С) и давлению p (мм рт.ст.) воздуха.

Расчёты показали, что суммарные потери на корону в трех фазах при их горизонтальном расположении (что имеет место на ВЛ 330–750 кВ) можно достаточно точно рассчитать, если $U_{0\Pi}$ и b_i определять по средней по фазам ёмкости. Тогда в формуле (17) значение b будет равно $3b_i$, а

$$b_i = \frac{w}{p} C \frac{2H}{r_{\text{э.л}}} \ln \frac{r_{\text{э.л}}}{r_{\text{э.о}}} \quad (20)$$

где w – угловая частота сети, рад/с; $r_{\text{э.л}} = r_p \sqrt{\frac{nr_{\Pi}}{r_p}}$ –

эквивалентный радиус расщепления проводов фазы, м; $r_{\text{э.о}} = (r_p - r_o) \sqrt{\frac{nr_o}{r_p + r_o}}$ – эквивалентный

радиус объёмных зарядов фазы, м; $H = H_{\text{min}} + 0,25f$ – эквивалентная высота проводов над землёй, м; H_{min} – минимальное расстояние от проводов до земли, м; $r_p = \frac{a}{2 \sin(p/n)}$ – радиус расщепления проводов, м; a – шаг расщепления фазы, м;

$$r_o = 2,35k_H \sqrt{m_c r_{пц}^2 + \frac{n-1}{1 + \frac{r_p}{2k_H \sqrt{m_c r_{пц}}}}}$$

— радиус

объёмных зарядов, м; $m_c = 0,87$ при хорошей погоде.

Погрешность определения потерь на корону в хорошую погоду:

$$DP_{к.х} = bL_{к.х} \left(0,0735 \times 2U - 0,275 \times 3 \frac{U^2}{U_{0П}} + \frac{U^3}{U_{0П}^2} \frac{\Delta U}{\bar{U}} + 0,275 \frac{U^3}{U_{0П}^2} - 0,268 \times 2 \frac{U^4}{U_{0П}^3} \frac{\Delta U}{\bar{U}} \frac{\Delta U}{\bar{U}} \right)$$

Погрешность определения по (19) (от d и C):

$$DU_{0П} = \frac{2\pi n r_{пц} (0,8 + 0,2k_H)}{Ck_H} 2,4 \times 10^6 \left(1 + \frac{0,067}{(r_{пц} d)^{0,38}} \frac{\Delta d}{\bar{d}} \right) - \frac{2\pi n r_{пц} (0,8 + 0,2k_H)}{Ck_H} 2,4 \times 10^6 \left(1 + \frac{0,108}{(r_{пц} d)^{0,38}} \frac{\Delta C}{\bar{C}} \right)$$

где погрешность значения рабочей ёмкости фазы $DC \leq 3\%$.

Погрешность плотности воздуха равна:

$$Dd = \frac{0,386}{273 + t} Dp - \frac{0,386 p}{(273 + t)^2} Dt,$$

где Dp — в мм рт. ст.; Dt — в °C.

Рассчитаем конкретные значения погрешностей определения потерь на корону в хорошую погоду. На рис. 5 представлена зависимость погрешности расчета потерь на корону в хорошую погоду для разных значений нагрузки ТН при $Dp = 1$ мм рт. ст., $Dt = 1$ °C, $DC = 3\%$.

На рис. 6 представлена зависимость суммарной погрешности расчета потерь на корону в хорошую погоду и нагрузочных потерь без учета методической погрешности.

Из рис. 5 можно сделать вывод, что инструментальная погрешность определения потерь в проводах невелика и при максимальном абсолютном значении 229 кВт составляет 19% значения потерь мощности на корону в хорошую погоду рассматриваемой линии. Что касается суммарной погрешности определения потерь на корону в хорошую погоду и нагрузочных потерь в линии, то из рис. 6 видно, что ее значение достаточно велико — 1380 кВт, что сопоставимо со значениями потерь на корону в хорошую погоду рассматриваемой линии — 1200 кВт.

Теперь определим погрешность расчета потерь на корону в плохую погоду, которые в УИК рассчитываются по следующей формуле:

$$\bar{P}_{ki} = \bar{P}_{li} - \bar{P}_{2i} - \bar{P}_{\pi i} - \Pi_i. \tag{22}$$

Значения $\bar{P}_{\pi i}$ и Π_i можно выразить через истинные значения $\bar{P}_{\pi ист}$, $\bar{\Pi}_{ист}$ и их погрешности $D\bar{P}_{\pi i}$ и $D\Pi_i$. Тогда

$$\bar{P}_{\pi i} = \bar{P}_{\pi ист} + D\bar{P}_{\pi i}, \quad \bar{\Pi}_i = \bar{\Pi}_{ист} + D\bar{\Pi}_i,$$

и в соответствии с формулой (6)

$$\begin{aligned} \bar{\Pi}_i &= \bar{P}_{li} - \bar{P}_{2i} (\bar{P}_{\pi ист} + D\bar{P}_{\pi i}) - (\bar{P}_{к.х ист} + D\bar{P}_{к.х i}) = \\ &= \bar{\Pi}_{ист} - (D\bar{P}_{\pi i} + D\bar{P}_{к.х i}). \end{aligned} \tag{23}$$

Подставив (23) в (22), получим:

$$\begin{aligned} \bar{P}_{ki} &= \bar{P}_{li} - \bar{P}_{2i} (\bar{P}_{\pi ист} + D\bar{P}_{\pi i}) - (\bar{\Pi}_{ист} - D\bar{P}_{\pi i} - D\bar{P}_{к.х i}) = \\ &= \bar{P}_{li} - \bar{P}_{2i} - \bar{P}_{\pi ист} - \bar{\Pi}_{ист} + D\bar{P}_{к.х j} \end{aligned}$$

Таким образом, при определении потерь на корону в плохую погоду систематическая погрешность

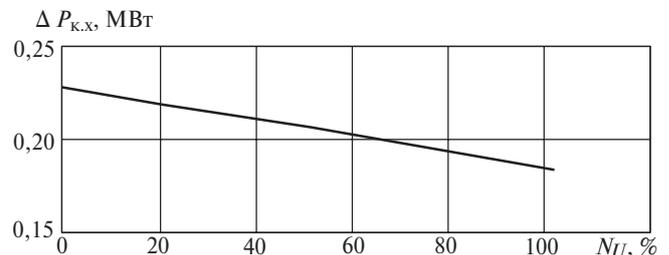


Рис. 5. Результаты расчетов погрешности определения потерь на корону в хорошую погоду в зависимости от загрузки и ТН

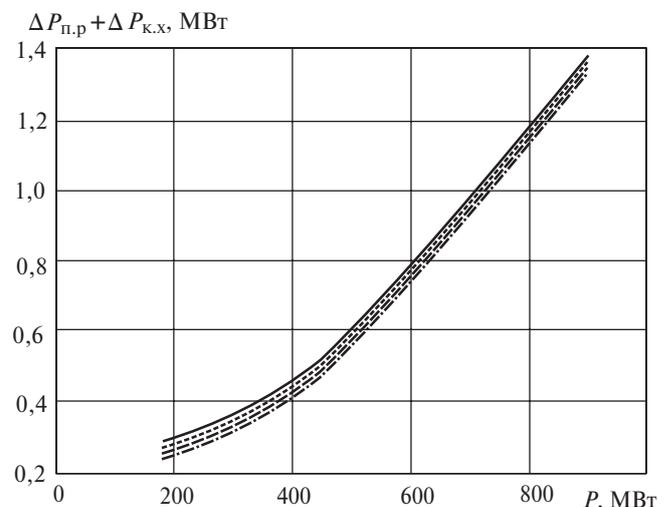


Рис. 6. Результаты расчетов суммарной погрешности определения потерь на корону в хорошую погоду и нагрузочных потерь в линии в зависимости от передаваемой мощности (при различной нагрузке ТН — от 0 до 100%)

ность потерь в проводах компенсируется. Следовательно, погрешность определения потерь на корону в плохую погоду равна погрешности определения потерь на корону в хорошую погоду (229 кВт в нашем случае).

Расчеты проводились для линии напряжением 500 кВ. Для линий других классов напряжения (330 кВ и 750 кВ) относительные погрешности будут близки к приведенным результатам.

Выводы. 1. Расчеты методической погрешности определения потерь от токовой нагрузки по упрощенной формуле (12), которая используется в УИК, по сравнению с результатами, полученными по формуле (8), учитывающей волновые свойства ВЛ СВН, показали, что для более точного определения нагрузочных потерь в проводах необходимо использовать формулу (8).

2. Максимальное значение относительной инструментальной систематической погрешности измерения потерь от нагрузки для рассматриваемой линии составляет 4% по отношению к полным нагрузочным потерям, а по отношению к натуральной мощности ВЛ — 0,128%. Наибольшую погрешность в расчет нагрузочных потерь вносит погрешность определения температуры провода. Установка датчиков температуры на провода ВЛ позволит с большой точностью определять температуру провода и значение удельного сопротивления проводов линий электропередачи.

3. Максимальная погрешность определения потерь на корону в хорошую погоду для рассматриваемой линии составляет 19% потерь мощности на корону в тех же метеоусловиях для ВЛ 500 кВ.

4. Погрешность определения потерь на корону в плохую погоду по алгоритмам УИК равна инстру-

ментальной погрешности определения потерь на корону в хорошую погоду, рассчитываемой по полиному (17), что составляет 4,2% по отношению к потерям на корону в плохую погоду. Погрешность расчета потерь на корону по [2] может составлять от нескольких десятков до сотен процентов [8].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Тамазов А.И.** Корона на проводах воздушных линий переменного тока. — М.: Спутник+, 2002.
2. **Руководящие** указания по учету потерь на корону и помех от короны при выборе проводов воздушных линий электропередачи переменного тока 330 — 750 кВ и постоянного тока 800 — 1500 кВ. — М.: СЦНТИ, 1975.
3. **Шаров Ю.В., Гаджиев М.Г.** Измерение потерь мощности на корону в линиях сверхвысокого напряжения ОАО «ФСК ЕЭС». — ЭЛЕКТРО, 2010, № 3.
4. **Зарудский Г.К.** Анализ изменения режимных параметров воздушных линий сверхвысокого напряжения. — Электричество, 1998, №5.
5. **Воротничкий В.Э.** Оценка погрешностей расчета переменных потерь электроэнергии в ВЛ из-за неучета метеоусловий. — Электрические станции, 2008, №10.
6. **Никифоров Е.П.** Предельно допустимые токовые нагрузки на провода действующих ВЛ с учетом нагрева проводов солнечной радиацией. — Электрические станции, 2006, №7.
7. **Тамазов А.И.** Погрешности измерения мощностей и электроэнергии. — ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность, 2002, № 3.
8. **Тамазов А.И.** Упрощенное определение среднегодовых удельных потерь мощности и энергии на корону. — Электричество, 1999, №11.

[06.12.10]

Автор: Гаджиев Магомед Гаджиевич окончил Московский энергетический институт (МЭИ (ТУ)) в 2006 г. Ведущий эксперт Службы электрических режимов ОАО «ФСК ЕЭС». Аспирант кафедры «Электроэнергетические системы» МЭИ (ТУ).

* * *

Уважаемые авторы!

Редакция публикует при каждой статье краткие сведения об авторах. В связи с этим просим вас при направлении статьи в редакцию сообщать:

полные имена и отчества всех авторов;

какой факультет, какого вуза и когда закончил;

когда получил ученую степень, где и по какой тематике (теме) была защита; место работы и должность.

Кроме того, напоминаем, что на каждую статью следует представлять краткий (4—5 предложений) реферат на русском и английском языках (включая название), а также ключевые слова.