

## УТОЧНЕНИЕ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕМЕНТАХ ВОЗДУШНЫХ ЛЭП

Руцкий В.М., Овсянников А.Г., Нечитаев Р.А.

Рассматривается новая, уточненная, методика расчета потерь от протекания токов утечки по наружным изоляционным конструкциям, а также, впервые рассматриваются потери в опорах воздушных линий электропередачи, вызванных индуцированными токами

В руководстве для практических расчетов [1] потери электроэнергии приведены расчетные и экспериментальные данные технических потерь. К таким потерям справедливо отнесены потери от токов утечки по изоляторам воздушных линий электропередачи (ВЛ). Они обусловлены происходящими в изоляторах физическими процессами, выражающимися в преобразовании части электроэнергии в тепло. Такие потери не могут быть измерены, их значение можно определить только расчетным путем.

Однако, предлагаемая в руководстве методика расчета потерь электроэнергии из-за токов утечки по изоляторам ВЛ, при увлажнении их загрязненной поверхности, представляется недостаточно обоснованной. Мощность потерь на одном изоляторе предлагается рассчитывать в зависимости от сопротивления изолятора. При этом допускается, что значение сопротивления изолятора в период увлажнения остается неизменным.

Такое допущение не отражает электрофизические процессы при увлажнении загрязненной изоляции. В процессе увлажнения из раствора электролита на поверхности изолятора испаряется влага, образуются кольцевые подсушенные зоны, периодически возникают и гаснут частичные дужки. При этом на небольшой фоновый переменный ток накладываются броски тока утечки во время горения частичной дуги, т.е. возникает, так называемый, режим перемежающихся дужек. Кроме того, в процессе увлажнения происходит вымывание солей из слоя загрязнения. Использовать при расчете тока утечки, значение сопротивления изолятора, измеренное в отсутствие этих процессов, как это предлагается в [1] представляется ошибочным.

Например, значения токов утечки, рассчитанные согласно рассматриваемой методике для гирлянды изоляторов ВЛ 110 кВ составляют 8 мА и 76 мА для районов с 1-й и 7-й степенью загрязнения атмосферы (СЗА) соответственно. Однако экспериментально установлено [2], что даже в предельном случае, когда изоляторы находятся в предразрядном режиме, только амплитуды импульсов токов утечки составляют 10 мА и более. В нормальном эксплуатационном режиме, при верно выбранном уровне изоляции, эти значения будут меньше. Очевидно, что результаты расчетов потерь электроэнергии по токам утечки, значения которых сопоставимы с амплитудами импульсов этих токов при работе изоляторов в предразрядном режиме, будут необоснованно завышены.

Кроме того, ток утечки зависит не только от степени загрязнения поверхности изолятора, то есть от степени загрязнения атмосферы или согласно седьмого издания ПУЭ от степени загрязнения (СЗ) [3], но и в значительной степени от вида и интенсивности увлажнения, что никак не учитывается в рассматриваемой методике расчета.

Также в методике не учитывается пространственная структура увлажняющих метеоявлений. В [4] рассмотрен так называемый коэффициент распределенности метеоявлений ( $K_{р.м.}$ ), показывающий какая часть трассы ВЛ охвачена данным метеоявлением. Среднего-

довое значение  $K_{p.m.}$ , различных увлажняющих метеоявлений, по данным [4] составляет в среднем примерно 0,5.

В [5,6] приводится более физически обоснованная методика расчета потерь электроэнергии из-за токов утечки по изоляционным конструкциям наружных электроустановок. Согласно этой методике годовые потери в единичной изоляционной конструкции (гирлянде изоляторов) рассчитываются как:

$$A = K [T_T M(P_T) + T_M M(P_M) + T_D M(P_D) + T_R M(P_R)], \quad (1)$$

где  $M(P_T)$ ,  $M(P_M)$ ,  $M(P_D)$  и  $M(P_R)$  - математическое ожидание мощности потерь энергии в единичной изоляционной конструкции соответственно при туманах, мороси, дождях и росе, кВт;  $T_T$ ,  $T_M$ ,  $T_D$ , и  $T_R$  - годовая продолжительность туманов (при положительной температуре воздуха), мороси, дождей и росы, час.

Значения  $M(P_T)$ ,  $M(P_M)$ ,  $M(P_D)$  и  $M(P_R)$  при заданной степени загрязнения изоляции рассчитываются по формулам:

$$\begin{aligned} M(P_T) &= \sum_{i=1}^6 \Psi(U_{Ti}) P_T(U_{Ti}); \\ M(P_M) &= \sum_{i=1}^{11} \Psi(U_{Mi}) P_M(U_{Mi}); \\ M(P_D) &= \sum_{i=1}^{13} \Psi(Q_{Di}) P_D(Q_{Di}); \\ M(P_R) &= P_R(Q_R); \end{aligned} \quad (2)$$

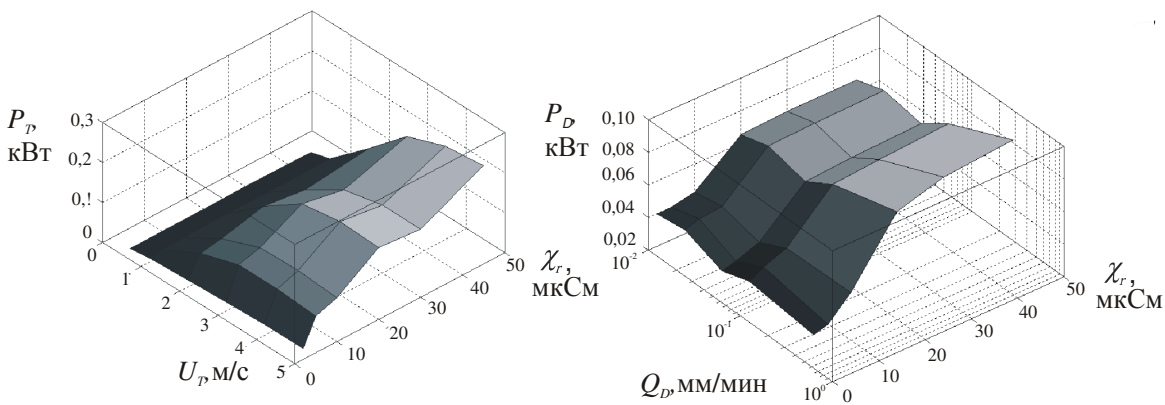
где  $\Psi(U_{Ti})$  - вероятность  $i$ -той скорости ветра ( $U_{Ti}$ ) при туманах (6 градаций),  $\Psi(U_{Mi})$  - вероятность  $i$ -той скорости ветра ( $U_{Mi}$ ) при мороси (11 градаций),  $\Psi(Q_{Di})$  - вероятность дождей  $i$ -той интенсивности ( $Q_{Di}$ ) (13 градаций);  $P_T(U_{Ti})$ ,  $P_M(U_{Mi})$ ,  $P_D(Q_{Di})$  и  $P_R(Q_R)$  - мощность потерь энергии при заданной степени загрязнения изоляции соответственно во время туманов при  $i$ -той скорости ветра; мороси при  $i$ -той скорости ветра, дождей  $i$ -той интенсивности и росе при постоянной, характерной для средней полосы России интенсивности выпадения росы ( $Q_R$ ), кВт.

Мощность потерь энергии при туманах и мороси определяется в зависимости от скорости ветра, так как в этих случаях влага попадает на поверхность изолятора в результате инерционного осаждения, то есть интенсивность увлажнения поверхности изолятора прямо пропорциональна скорости ветра.

Степень загрязнения изоляции оценивается величиной поверхностной проводимости при увлажнении слоя загрязнения до насыщения ( $\chi_r$ ). Связь поверхностной проводимости при увлажнении слоя загрязнения до насыщения с СЗА или СЗ может быть определена из данных приведенных в нормативных документах [3,5].

Значения  $P_T(U_{Ti})$ ,  $P_M(U_{Mi})$ ,  $P_D(Q_{Di})$  и  $P_R(Q_R)$  определялись с использованием динамической математической модели изменения электрических характеристик изоляции в процессе ее увлажнения различного по виду и интенсивности. На рис.1, в качестве примера, приведены значения  $P_T(U_{Ti})$ ,  $P_D(Q_{Di})$  при различной степени загрязнения изоляции.

В табл.1 приведены результаты расчета мощности потерь в отдельных изоляторах гирлянд контактной сети железных дорог переменного тока (номинальное напряжение в контактной сети 25 кВ). Мощность потерь, рассчитанная согласно [5,6], определялась как средневзвешенная для туманов, мороси и дождей, продолжительность которых характерна для Европейской части России, мощность потерь при росе не учтена из-за их малости.



а) при тумане в зависимости от степени загрязнения изоляции и скорости ветра

б) при дожде в зависимости от степени загрязнения изоляции и интенсивности дождя

Рис.1 Средняя за однократное увлажнение мощность потерь электроэнергии в гирлянде изоляторов контактной сети на напряжение 25 кВ железных дорог

Таблица 1

Мощность потерь от токов утечки, Р, кВт

Параметры	СЗА		
	2	5	6
Число изоляторов в гирлянде	3	4	5
Напряжение на одном изоляторе гирлянды, кВ	8,33	6,25	5,00
Мощность потерь, рассчитанная согласно [1], Р, кВт	0,061	0,081	0,093
Мощность потерь, рассчитанная по [5,6], кВт	0.009	0,015	0,014

Как видно из результатов расчетов, мощность потерь, рассчитанная согласно [1] в 5-7 раз превышает результаты расчетов согласно [5,6]. С учетом того, что в [1] не учитывается пространственная структура увлажняющих метеоявлений и ряд других факторов эта разница увеличится еще не менее чем в два раза. Таким образом, при расчете потерь электроэнергии из-за токов утечки по изоляторам ВЛ по методике [1] потери будут, как представляется, необоснованно завышены более чем на порядок.

В [5,6] значения  $P_T(U_{Ti})$ ,  $P_M(U_{Mi})$ ,  $P_D(Q_{Di})$  и  $P_R(Q_R)$  определялись для гирлянд изоляторов контактной сети железных дорог. Так как падение напряжения на одном изоляторе гирлянды в контактной сети переменного тока одного порядка с падением напряжения на одном изоляторе гирлянд ВЛ различных классов напряжения, полученные значения мощности потерь для гирлянд изоляторов контактной сети железных дорог переменного тока могут быть использованы и для расчета потерь электроэнергии в изоляции ВЛ. Однако более точные результаты могут быть получены при моделировании мощности потерь для изоляции ВЛ различных классов напряжения.

Другой вид потерь, о котором вообще не упоминается в [1] и который является наиболее интересным вследствие своей неизвестности, заключается в нагреве элементов конструкций опор, происходящего от индуктированных токов. Эти токи, в свою очередь, вызваны основным током промышленной частоты в линии.

Как и во многих случаях, данный факт заставил обратить на себя внимание случайно. Проводя авиаинспекцию ВЛ 500 кВ, специалисты ОАО «Электросетьсервис ЕНЭС» зафиксировали довольно любопытную термограмму анкерной опоры 500 кВ с аномальным нагревом в местах соединения траверсы со стойками опоры (рис.2).

На термограмме видно, что перегрев составлял порядка 2-3 градусов. Нагрев возникал от тока в теле опоры, индуктированного магнитным полем, которое, в свою очередь, возни-

кало от протекания токов в проводах и асимметрией их расположения в пространстве. Тело опоры образует короткозамкнутый контур «траверса – стойки опоры – земля», охватывающий среднюю фазу. Протекание тока, индуктированного в этом контуре, вызывает дополнительные потери энергии.

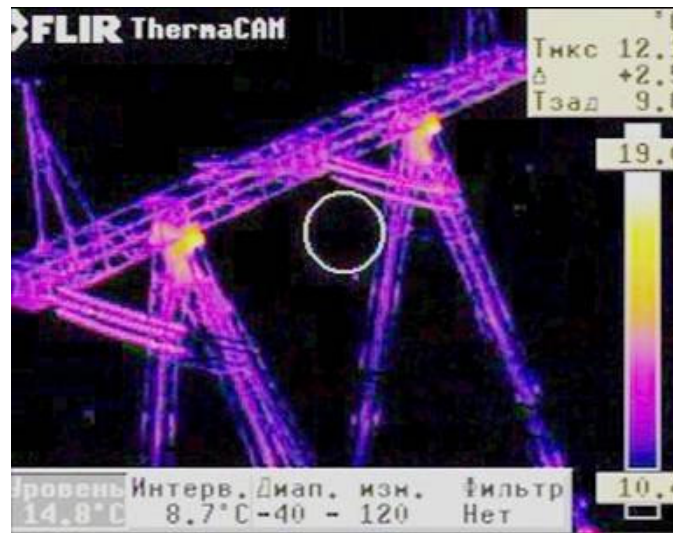


Рис.2 Термограмма анкерной опоры 500 кВ

Сам по себе нагрев не был опасен, и, естественно было предположить, что он возникал из-за относительно высокого переходного сопротивления узлов крепления, которое могло быть следствием коррозии поверхности стали.

Оценим, в первом приближении, величину энергии, потраченной на данный нагрев. Если принять теплоемкость стали  $c = 450 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ ,  $\Delta T = 2^\circ\text{C}$ , массу, к примеру,  $m = 100 \text{ кг}$ , тогда выделяемая энергия в месте перегрева  $Q_{\text{п}}$  определится как:

$$Q_{\text{п}} = c \cdot m \cdot \Delta T. \quad (3)$$

И результат составит:  $Q_{\text{п}} = 450 \cdot 100 \cdot 2 = 90 \text{ кДж}$ . Это довольно большая энергия. Более того, с учетом потерь на конвекцию и излучение эти цифры должны увеличиться.

Понятно, что во всех остальных случаях потери энергии тоже были, только внешне они себя не проявили в виде нагревов. Конструкции опор одинаковы, ток в средней фазе один и тот же. Поэтому на всех опорах, где нагрев узлов сочленения траверсы со стойками опоры не был выявлен, энергия потерь, связанных с индуктированным током,  $P_i$ , рассеивается в сопротивлении земли между стойками опоры:

$$P_i = I_i^2 \cdot R_{\Sigma} \quad (4)$$

где  $I_i$  – ток, индуктированный нескомпенсированным магнитным полем тока в средней фазе,  $R_{\Sigma}$  – суммарное сопротивление контура, созданного опорой и землей.

В [7] приводятся результаты измерения наведенных токов в оттяжках ВЛ 500 кВ. В зависимости от типа опоры, они меняются в диапазоне от 2 до 9 А.

Чтобы лучше разобраться в данном вопросе, процесс был смоделирован в пакете Comsol 3.2 (FemLab).

Стойки и траверсу опоры смоделируем из стальных брусков со стороной сечения 0.1 м, исходя из условия сохранения общей массы модели и опоры. Величина амплитуды тока в фазных проводах принималась равной 1 кА, сопротивление заземления – 5 Ом.

На рис.3 приведено распределение напряженности магнитного поля около опоры за половину периода промышленной частоты с интервалом фазы в  $60^\circ$ . Позиция рисунка под буквой «в» отвечает максимуму основного тока фазы «В».

На рис.4 показано изменение ориентировки силовых линий и их плотности относительно опоры также за половину периода промышленной частоты с интервалом в 60°.

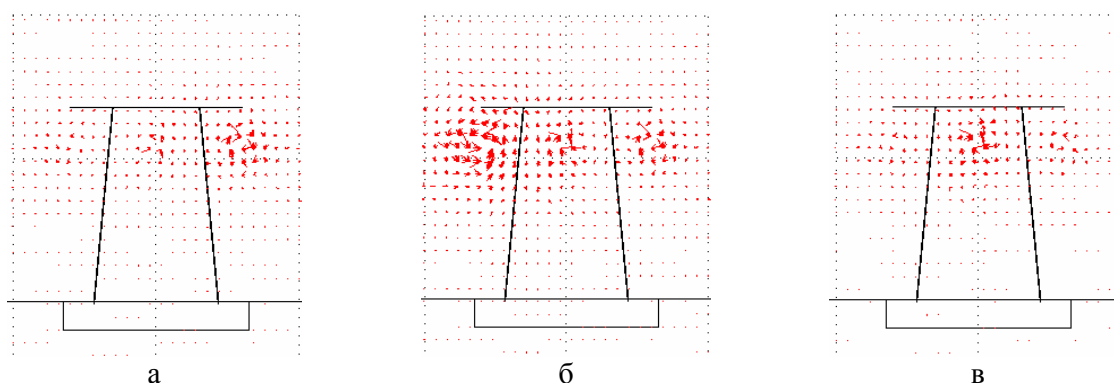


Рис.3 Распределение напряженности магнитного поля за полпериода промышленной частоты: а - фаза 0°, б - фаза 60°, в - фаза 120°

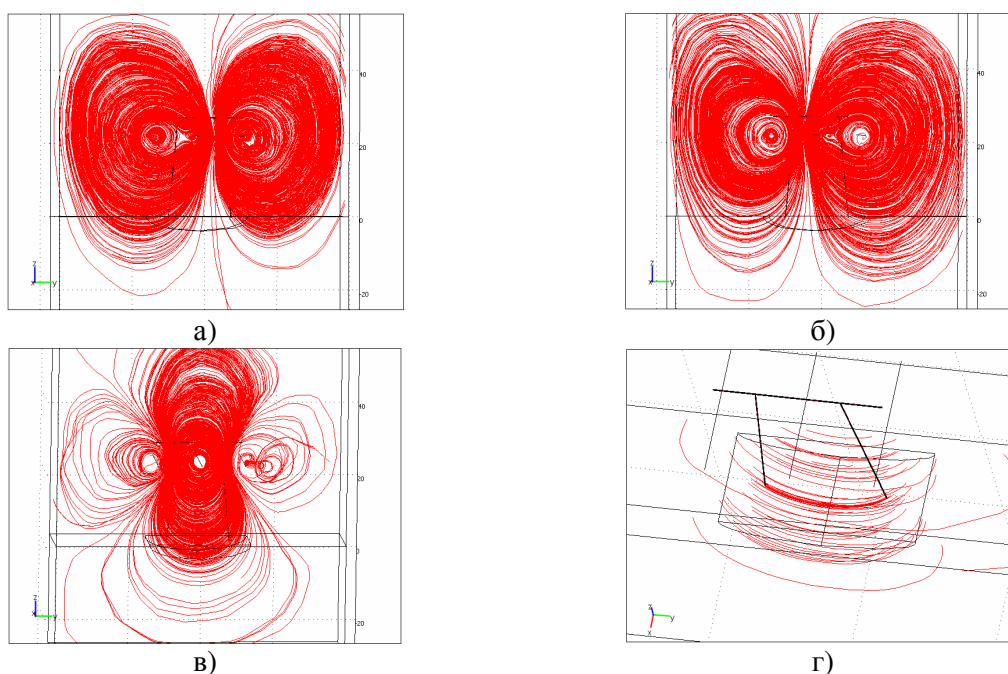


Рис.4 Распределение и плотность силовых линий магнитного поля вокруг опоры: а) фаза 0°, б) фаза 60°, в) фаза 120°, г) фаза 120°

Как видно рис.4, в силовые линии замыкаются непосредственно вблизи стоек опоры, в отличие от изображений «а» и «б», где магнитное поле проникает значительно глубже в землю, а это как раз доказывает существование замкнутого контура «траверса – стойки опоры – земля» по которому протекает ток. Более того, на рис.4, г видно, что плотность магнитного потока в земле в плоскости опоры существенно больше.

Далее была определена плотность индуцированного тока в каждой точке опоры. Результаты расчетов приведены на рис.5.

Проинтегрировав по объему обе стойки опоры со значениями индуцированной плотности тока, получим одинаковые величины, равные приблизительно 160 А·м. Учитывая, что в данной модели высота стойки принималась равной 27 м, легко определить величину текущего в контуре тока, которая равна  $I = \frac{160 \text{ А} \cdot \text{м}}{27 \text{ м}} \approx 6 \text{ А}$ . Сравнивая расчетное значение с приве-

денными выше величинами токов, измеренных в оттяжках автором [7], можно утверждать, что расчетная величина индуцированного тока близка к измеренным.

Безусловно, измерение токов в стойках опоры поможет ответить на многие, пока неясные и недоказанные расчеты, но приведенные данные можно точно считать точкой отсчета, от которой дальше следует двигаться в решении поставленной задачи.

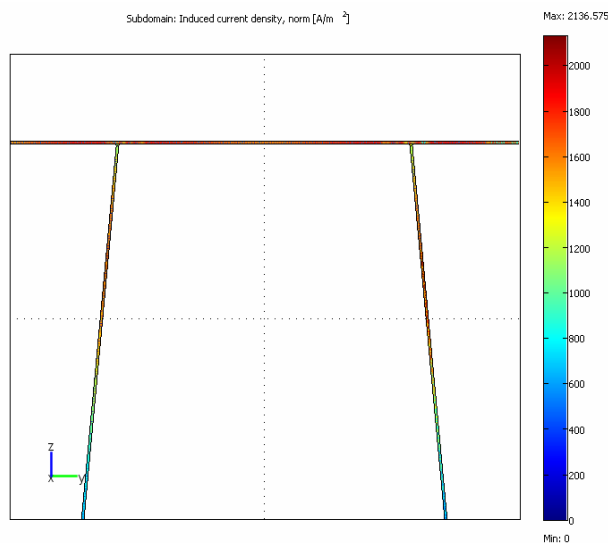


Рис.5 Распределение плотности индуцированного тока в опоре

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Уточненный расчет потерь от токов утечки, основанный на математической модели разрядных процессов на увлажненной и загрязненной изоляции, показал, что величина этих потерь почти на порядок меньше, чем рекомендованные в нормативных документах.

2. Впервые обращено внимание на составляющую потерь, связанную с протеканием индуцированных в теле опор portalного типа токов. С использованием математической модели процесса получены расчетные значения индуцированных токов, близкие к экспериментальным данным, что подтверждает и собственно существование данного вида потерь энергии, и адекватность математической модели.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Железко Ю. С., Артемьев А. В., Савченко О. В. Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях: Руководство для практических расчетов. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004.-280
- [2] Мерхалев С. Д., Соломоник Е. А. Изоляция линий и подстанций в районах с загрязненной атмосферой.– М.: Энергия, 1973. – 160с.
- [3] Правила устройства электроустановок: Раздел 1. Общие правила. Гл. 1.1, 1.2, 1.7, 1.9; Раздел 7. Электрооборудование специальных электроустановок. Гл. 7.5, 7.6, 7.10: 7-е изд. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002. – 184с.
- [4] Н. И. Орлова, А. М. Ментюкова. О коэффициенте распределенности опасных метеоявлений вдоль трасс ВЛ, проходящих в районах с различными природными условиями // "Повышение надежности работы изоляции линий и электрооборудования высокого напряжения": Тезисы докл. респ. науч.-техн. конф. – Ташкент: 1986. – С.31 – 37.
- [5] Руцкий В.М. Совершенствование методов проектирования и эксплуатации изоляции наружных электроустановок систем электроснабжения железных дорог: Диссертация д-ра технич. наук: 13. 05. 2005/ Екатеринбург: 2004. – 373 с.
- [6] Руцкий В.М. Математическое моделирование электрических характеристик изоляции наружных электроустановок систем электроснабжения железных дорог. – Самара: СамГАПС, 2004. – 172с.
- [7] Тарасов А.Г. Обеспечение долговечности искусственных и естественных заземлителей опор воздушных линий с оттяжками. (Материалы Первой Российской конференции по заземляющим устройствам: Сборник докладов/Под ред. Ю.В.Целебровского – Новосибирск: Сибирская энергетическая академия, 2002. – 256 с. 221-228