

УДК 621.3.017

## Индукционные потери энергии в опорах воздушных линий электропередачи\*

А.Г. ОВСЯННИКОВ<sup>1</sup>, Р.А. НЕЧИТАЕВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, профессор. E-mail: oag@nspb.ru

<sup>2</sup> 630126, РФ, г. Новосибирск, ул. Выборная 99/7, соискатель кафедры техники и электрофизики высоких напряжений Новосибирского государственного технического университета, действительный член Всемирной академии наук комплексной безопасности. E-mail: 79232493333@yandex.ru

В данной статье обсуждается проблема, связанная с потерями при передаче электрической энергии на большие расстояния по воздушным линиям электропередачи. Особое внимание уделено одному из видов технологических потерь, которые до сих пор не учитываются в нормативных документах Российской Федерации. Эти потери появляются из-за индуцированных токов, которые формируются собственными магнитными полями от токов в проводах линии. Рассказывается о проявлениях индукционных токов в опорах воздушных линий электропередачи. Обсуждаются результаты экспериментальных исследований индукционных токов и температур нагревов в опорах воздушных линий электропередачи с иллюстрациями в видимом и инфракрасном диапазонах волн. Приводятся результаты многолетних измерений индукционных токов в оттяжках опор воздушных линий различного типа. В программной среде Comsol Multiphysics выполняется построение компьютерной модели, при расчете которой методом конечных элементов получены изображения магнитного поля, линий магнитной индукции и нагрева токами Фуко. Также теоритически описываются рассматриваемые физические процессы на основании законов термодинамики и электротехники. Используя математический редактор Mathcad, графически определяются предельные значения мощности индукционного тока и температуры нагрева узлов. Результатом приведенных вычислений является суммарный расчет годовых индукционных потерь энергии в опорах при передаче электрической энергии по высоковольтной воздушной линии 500 кВ. Полученное значение сравнивается с существующими нормативами. В заключение рассматриваются существующие и предлагаются инновационные мероприятия, позволяющие повысить экономичность и снизить технологические потери энергии воздушных линий электропередачи.

**Ключевые слова:** потери энергии, воздушные линии электропередачи, магнитная индукция, индукционный ток, токи Фуко, индукционный нагрев, инфракрасное изображение, избыточная температура, первый закон термодинамики

DOI: 10.17212/1814-1196-2016-2-129-140

---

\* Статья получена 23 декабря 2015 г.

## ВВЕДЕНИЕ

Потребители электроэнергии имеются повсюду. Производится же она в сравнительно немногих местах, близких к источникам топливо- и гидроресурсов.

Электрэнергию не удастся консервировать в больших масштабах. Она должна быть потреблена сразу же после получения. Поэтому возникает необходимость в передаче электрэнергии на большие расстояния.

Для передачи электрэнергии на большие расстояния наиболее экономично использовать воздушные линии электрпередачи (ВЛ) высокого напряжения.

Применение высокого напряжения требует дополнительных затрат на создание высокопрочных конструкций ВЛ увеличенных габаритных размеров с большим запасом прочности и большими изоляционными промежутками.

Можно употребить метафору, что опора ВЛ – это фундамент электрической сети. До недавнего времени металлические опоры рассматривались как строительные конструкции, а не как электротехнический элемент. Однако не сложно убедиться, что в металлических элементах конструкций опор ВЛ переменного тока протекают токи, индуцированные токами в фазных проводах линии. Индукционные токи вызывают нагрев элементов опор и потери электрэнергии. В свою очередь, увеличение потерь приводит к увеличению затрат на транспорт, а значит, и стоимости электрэнергии.

Потери электрэнергии при ее передаче в электрических сетях нормируются как условно-постоянные и нагрузочные [1]:

- потери на холостой ход силовых трансформаторов;
- потери на корону в воздушных линиях;
- потери в синхронных компенсаторах, батареях статических конденсаторов, статических тиристорных компенсаторах, шунтирующих реакторах;
- потери в соединительных проводах и сборных шинах распределительных устройств подстанций;
- потери в системе учета электрэнергии (трансформаторах тока, трансформаторах напряжения, счетчиках и соединительных проводах);
- потери в вентильных разрядниках, ограничителях перенапряжений;
- потери в устройствах присоединений высокочастотной связи;
- потери в изоляции кабелей;
- потери от токов утечки по изоляторам ВЛ;
- расход электрэнергии на собственные нужды подстанций;
- расход электрэнергии на плавку гололеда;
- потери в воздушных и кабельных линиях;
- потери в трансформаторах (автотрансформаторах);
- потери в шинопроводах;
- потери в токоограничивающих реакторах.

Однако ни один из перечисленных пунктов не включает потери, обусловленные индукционными токами, как и методику их расчета.

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ ОТ ИНДУКТИРОВАННЫХ ТОКОВ

Токи, протекающие в проводах ВЛ, формируют магнитное поле. В каждой точке пространства магнитное поле определяется суперпозицией векторов напряженности магнитного поля от каждого фазного провода. Изменение результирующего магнитного поля во времени может вызывать индукцию в связанном потокоцеплении контуре.

До недавнего времени индукционные потери энергии связывались только с контурами «грозозащитный трос опоры – земля» при условии, что грозозащитный трос заземлялся на каждой опоре ВЛ. По сравнению с прочими эти потери достаточно заметны, потому что плоскость указанных контуров перпендикулярна силовым линиям магнитного поля, что приводит к максимально возможному потокоцеплению с контуром. На рис. 1 приведены картины магнитных полей, формируемых токами в проводах ВЛ 500 кВ в различные моменты времени. Расчеты магнитного поля были проведены с помощью программного пакета Comsol 3.2 (FemLab) [2].

С индукционными потерями энергии в тросовых контурах на линиях классов напряжения 110 кВ и 220 кВ мирятся, так как в них провода ВЛ расположены достаточно близко друг к другу, а величина токов в проводах относительно невелика. Как следствие, невелик и результирующий магнитный поток, возникающий при суперпозиции потоков, окружающих провода линии. На ВЛ классов напряжения 330 кВ и выше грозозащитные тросы имеют одностороннее заземление для исключения индукционных потерь энергии.

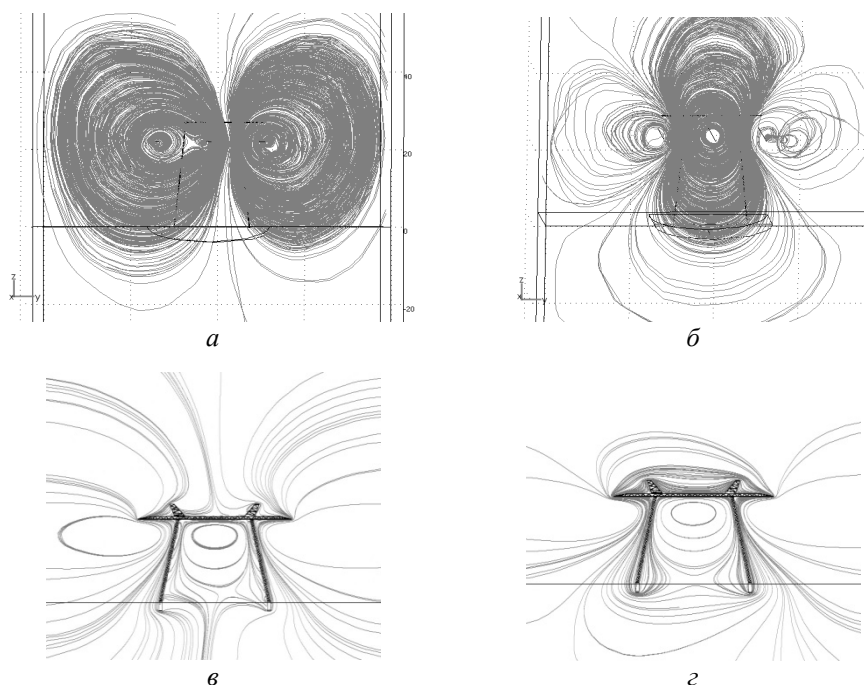


Рис. 1. Силовые линии магнитного поля (*a*, *б*) и линии магнитной индукции (*в*, *г*) вокруг проводов ВЛ 500 кВ при фазовом сдвиге 0 (*a*, *в*) и 120 (*б*, *г*) электрических градусов относительно тока в среднем проводе

Однако изменения магнитного потока во времени индуцируют токи и в других проводящих контурах, которые пронизывает результирующий магнитный поток, в том числе в контурах, образуемых элементами конструкции опор. Конечно, плоскость самой опоры имеет очень малое потокоцепление с магнитным полем проводов, но в ее объемных элементах всегда присутствуют контуры, расположенные под тем или иным углом к плоскости магнитного поля проводов. В сказанном легко убедиться на примере промежуточной опоры типа ПБ-500 ВЛ 500 кВ (см. рис. 2).

На термограммах этих опор, как показано на рис. 2, б, нередко наблюдаются участки с избыточной температурой 1...6 °С, преимущественно в местах, где силовые линии магнитной индукции претерпевают резкое изменение направления (углы, края). Конкретные превышения температуры нагрева зависят от нагрузки линии, скорости ветра, конструкции опоры и т. д.

Наиболее явно выделяются нагревы в местах соединения стоек опоры с траверсой. Более явно выраженный нагрев в месте соединения траверсы с опорой объясняется повышенным электрическим сопротивлением этого узла, в котором траверса свободно лежит на стойках опоры, а ее боковые смещения исключаются либо шипом в посадочном отверстии, либо болтовыми соединениями.

Металлическая конструкция опоры типа ПБ-500 состоит из двух стоек, траверсы, двух тросостоек и четырех оттяжек. Соответственно, под воздействием магнитного поля токи индуцируются в следующих замкнутых контурах:

- 1) стойка опоры – траверса – стойка опоры – грунт;
- 2) стойка опоры – оттяжка – грунт;
- 3) оттяжка – оттяжка – грунт;
- 4) оттяжка – траверса – оттяжка.

Очевидно, что оттяжка является общим звеном двух контуров «стойка опоры – оттяжка – грунт» и «оттяжка – траверса – оттяжка». По этой причине ток в оттяжках должен быть максимальным.

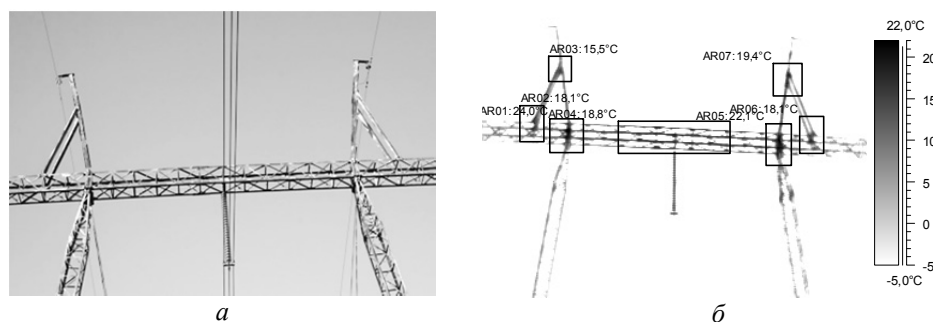


Рис. 2. Вид опоры ПБ-500 (а) и ее инфракрасное изображение (б)

В свое время вопрос об индукционных токах в оттяжках привлек внимание исследователей коррозии подземных конструкций опор. В табл. 1 приведены результаты натурных измерений индукционных токов в оттяжках различных ВЛ [3].

Таблица 1

## Значения индукционных токов в оттяжках различных ВЛ

Наименование ВЛ	Тип опор на оттяжках	Уровень максимальных индукционных токов, А	Примечание
Киндери-ЗайГРЭС	Портал ОРУ	8,95	На п/ст Киндери
Киндери-ЗайГРЭС	ПОЕМ	9,9	Опора № 14
Киндери-ЗайГРЭС	ПУ	1,25	Опора № 55
Ермаковская ГРЭС – Омск	ПОУЕМ	5,9	Опора № 61
ЭГРЭС-1 – Караганда	ПОУЕМ	5,1	Опора № 345
ЭГРЭС-1 – Целиноград	ПБ-3-1	2,0	Опора № 21
ЭГРЭС-1 – Таврическая	УБМ-17	5,6	Опора № 1067
ЕГРЭС – Экибастуз	ПБ-3-1	4,3	Опора № 244
Красноярск – С-Ш-ГЭС	ПО-1	6,3	Опора № 261
Иртышская – Таврическая	ПОУИМ	3,6	Опора № 675

Как и предполагалось, максимальные токи (до 10 А) бегут в оттяжках. Индукционные токи в стойках опоры достигают 2...3 А [4, 5, 6]. Величины индуктированных токов являются индивидуальными для каждой опоры, потому что они зависят от сопротивления электрической цепи в замкнутых контурах, которое, в свою очередь, зависит от сопротивлений контактных соединений (рис. 3), сопротивления заземления опоры и сопротивления грунта.

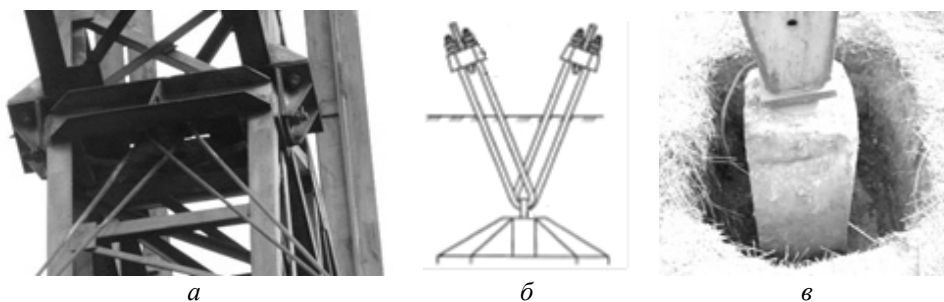


Рис. 3. Узлы опоры с контактными соединениями контуров с индуктированными токами:

*a* – узел крепления стойки, траверсы и оттяжек; *б* – крепление U-образных болтов к анкерной плите; *в* – заземление стойки опоры

В контуре «оттяжка – траверса – оттяжка» электрический ток замыкается через болтовые соединения крепежных элементов профильного типа (рис. 3, *a*) и контактную систему U-образных анкерных болтов (рис. 3, *б*).

Наряду с индукционными токами наблюдаются и проявления токов Фуко в виде локальных нагревов, причем в опорах всех типов. На рис. 1, *в*, *г* приведено программно-визуализированные изображения силовых линий магнитной индукции в промежуточной опоре ВЛ-500 с тросостойками, на кото-

рых видны места с их наибольшей плотностью, как правило, в этих местах и наблюдаются нагревы, обусловленные токами Фуко.

На рис. 2, б и рис. 4, а приведены примеры этого физического явления в виде термограмм с указанием нагретых областей траверс и тросостоек. А рис. 4, б показывает изображение двумерной компьютерной модели индукционного нагрева траверсы (Comsol Multiphysics: [сайт]. URL: <https://www.comsol.com/multiphysics/induction-heating>), также выполненное в программе Comsol Multiphysics [7, 8]. Нагревы токами Фуко в опорах воздушных линий небольшие. Как правило, это значение находится в диапазоне 0,5...1,5 °С.

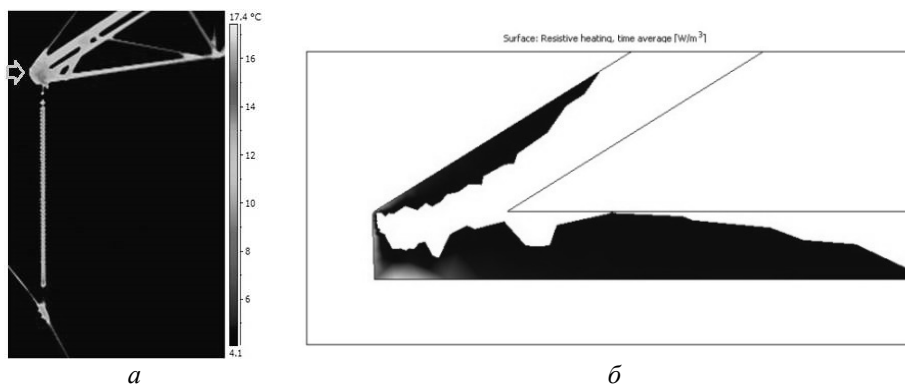


Рис. 4. Нагревы траверс токами Фуко:

а – термограмма; б – расчетное изображение

Вернемся к нагревам узлов соединения траверсы со стойками опоры и перейдем к тепловой задаче. Множественные измерения теплового поля опор показывают, что среднестатистическое значение избыточной температуры рассматриваемого узла находится в пределах 2...3 °С. На одной опоре типа ПБ-500 расположено четыре таких узла. Масса каждого узла как минимум равна 25 кг. Исходные данные для решения этой тепловой задачи сведены в табл. 2.

Запишем следствие из первого закона термодинамики:

$$Q_{\text{наг}} - Q_{\text{изл}} - Q_{\text{конв}} = \Delta Q_{\text{уст}}, \quad (1)$$

где  $Q_{\text{наг}}$  – количество теплоты, выделяющееся на переходном контактном сопротивлении узла,  $Q_{\text{изл}}$  – количество теплоты, излучаемое нагретым узлом в окружающую среду,  $Q_{\text{конв}}$  – количество теплоты, отводимое от нагретого узла за счет естественной конвекции,  $\Delta Q_{\text{уст}}$  – количество теплоты, необходимое для нагрева узла до установившейся температуры.

Рассмотрим каждое слагаемое уравнения (1) отдельно.

С одной стороны, согласно закону Джоуля–Ленца, системой совершается работа индукционными токами, равная количеству теплоты, выделяющемуся в сопротивлении  $R$  одного узла опоры за время  $t$ :

$$Q_{\text{наг}} = I^2 R t. \quad (2)$$

С другой стороны, совершается работа охлаждения нагретого узла опоры по закону Ньютона [9, с. 434] за время  $t$ :

$$Q_{\text{конв}} = \alpha(T_2 - T_1)Ft. \quad (3)$$

Также происходит работа отвода тепла от нагретого узла опоры по закону Стефана–Больцмана [10, с. 109] за время  $t$ :

$$Q_{\text{изл}} = \varepsilon\sigma(T_2^4 - T_1^4)Ft. \quad (4)$$

Установившееся значение внутренней энергии (энтальпии) нагретого узла опоры

$$\Delta Q_{\text{уст}} = cm(T_2 - T_1). \quad (5)$$

Подставляя уравнения (2), (3), (4), (5) в (1), получаем

$$\left(I^2R - \varepsilon\sigma F(T_2^4 - T_1^4) - \alpha F(T_2 - T_1)\right)t = cm(T_2 - T_1). \quad (6)$$

Таким образом, выражение (6) показывает потери энергии, обусловленные индукционными токами в опорах воздушных линий электропередачи.

Размерностью уравнения (6) является расход электроэнергии [кВт · ч], равный энергии тела [Дж]. Другими словами, энергия тела показывает расход электроэнергии на передачу – «индикатор»! Кроме того, не стоит забывать, что это только видимый нагрев одного узла опоры, а есть еще нагревы в подземной части и нагревы токами Фуко.

Таблица 2

**Исходные данные тепловой задачи**

Наименование физической величины	Значение	Единица измерения
Площадь нагретого узла, $F$	0,8	м <sup>2</sup>
Масса нагретого узла, $m$	25	кг
Теплоемкость материала (сталь) узла, $c$	462	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$
Конвективный коэффициент теплоотдачи, $\alpha$ , при скорости ветра менее 3 м/с [11, с. 470]	10...20	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$
Температура окружающей среды, $T_1$	$T_1$	К
Температура нагретой области, $T_2$	$T_2$	К
Диапазон значений переходных контактных сопротивлений в рассматриваемом узле, $R$	0,1...10	Ом
Диапазон значений индукционных токов, $I$	0,1...10	А
Коэффициент излучательной способности стали, $\varepsilon$	0,92	Ед.
Постоянная Стефана–Больцмана, $\sigma$	$5,67 \cdot 10^{-8}$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$

Для исследования уравнения (6) определим обратную зависимость температуры нагрева узла  $T_2$  от времени  $t$ :

$$t(T_2) = \frac{cm(T_2 - T_1)}{I^2 R - \varepsilon \sigma F (T_2^4 - T_1^4) - \alpha F (T_2 - T_1)}. \quad (7)$$

Решение уравнения (7) удобно найти графическим способом, для чего воспользуемся программой Mathcad. На рис. 4 показано семейство кривых, отображающих предел температуры нагрева узла опоры при разных значениях температуры окружающей среды и значениях мощности электрической цепи 50 кВт и 30 Вт.

Таким образом, решением поставленной задачи будет значение мощности индукционного тока в замкнутом контуре, протекающего через рассчитываемый узел, равной 50 Вт, при которой температура нагрева составляет 2,5 °С. Умножив полученное значение мощности на четыре, получим мощность индукционных потерь видимых нагревов в одной опоре типа ПБ-500 (8):

$$I^2 R \cdot 4 = 200 \text{ Вт}. \quad (8)$$

Рассчитаем годовые потери электроэнергии видимых нагревов на 2,5 °С от индукционных токов для 500 опор типа ПБ-500 при условии, что линия неотключаемая:

$$\Delta W_{\text{инд}} = W_{\text{конт}} \cdot N_{\text{узлов}} \cdot N_{\text{опор}} \cdot T_{\text{прод}} = 50 \cdot 4 \cdot 500 \cdot 8760 = 876 \text{ МВт} \cdot \text{ч}, \quad (9)$$

где  $W_{\text{конт}}$  – мощность индукционного тока в замкнутом контуре,  $N_{\text{узлов}}$  – число узлов, подверженных нагреву индукционным током,  $N_{\text{опор}}$  – число опор в линии,  $T_{\text{прод}}$  – продолжительность рассматриваемого периода.

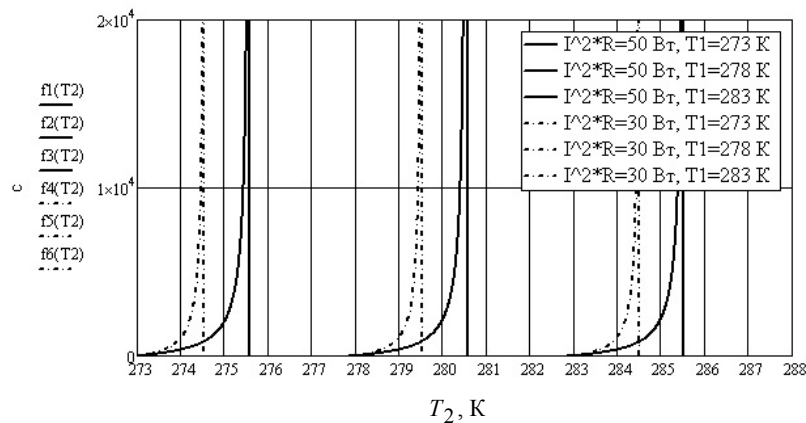


Рис. 5. Предельная температура нагрева узла опоры при мощности электрической цепи замкнутого контура 50 и 30 Вт

Таким образом, годовые индукционные потери электроэнергии на видимые нагревы узловых частей опор для неотключаемой линии 500 кВ с числом опор, равным 500, будут насчитывать до 876 тыс. кВт·ч в год. Для сравнения отметим, что удельные среднегодовые потери мощности на корону для линии



500 кВ в Сибири принимаются равными 6,85 кВт/км [1,12], что при длине линии 250 км составит приблизительно 15 000 тыс. кВт·ч в год. А потери мощности от токов утечки по изоляторам на такой линии составляют около 2 кВт/км [1, 13], соответственно, годовые потери насчитывают около 4380 тыс. кВт·ч в год.

Потери энергии от нагревов токами Фуко в опорах ВЛ больше всего зависят от нагрузки на линии. Расчетные значения потерь энергии на токи Фуко при рабочем токе промышленной частоты 1 кА, интегрированных по всей опоре, не превышают 5 Вт.

Справедливо будет утверждать, что с учетом нагревов в подземной части опор и нагревов токами Фуко значение потерь энергии в опорах как минимум удвоится.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье обращено внимание на удивительный факт, который был выявлен случайно – во время проведения тепловизионного контроля линий электропередачи. Речь идет о проявлении индукционных токов в опорах ВЛ.

В статье приведены результаты экспериментальных исследований индукционных токов и нагревов в металлических опорах воздушных линий электропередачи. С помощью уравнения теплового баланса решены задачи нахождения предельных значений мощности индукционных токов и температуры нагрева узловых частей графическим методом. Выполнен расчет годовых потерь электроэнергии данного вида для одной линии класса напряжения 500 кВ.

Приведенная методика расчета годовых потерь электроэнергии в воздушных линиях электропередачи, обусловленных протеканием индукционных токов в опорах, будет основой для расчета и нормирования.

В заключение необходимо отметить, что в настоящее время уже существуют мероприятия, которые позволяют решать данную проблему. Одна из таких мер, направленная на исключение появления индукционных токов в опорах ВЛ, – это применение изолирующих траверс и даже целиком опор из легких, высокопрочных композиционных материалов [14].

В традиционных металлических опорах возможно использование изолирующих вставок, исключаяющих протекание тока [15].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Приказ Минэнерго России от 30 декабря 2008 года № 326 «Об организации в Министерстве энергетики Российской Федерации работы по утверждению нормативов технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям»: официальный текст: по состоянию на 12 февраля 2009 г. Министерство юстиции Российской Федерации. – М.: [б. и.], 2008. – 86 с.

2. Руцкий В.М., Овсянников А.Г., Нечитаев Р.А. Уточнение потерь электроэнергии в элементах воздушных ЛЭП // Линии электропередачи – 2008: проектирование, строительство, опыт эксплуатации и научно-технический прогресс: сборник докладов третьей российской научно-практической конференции с международным участием / под ред. Ю.А. Лаврова. – Новосибирск, 2008. – С. 220–225.

3. Анохин А.Ю., Ведерников И.П., Тарасов А.Г. Проверка электрического сопротивления контактных соединений тросовых оттяжек опор ВЛ // Линии электропередачи – 2010: проектирование, строительство, опыт эксплуатации и научно-технический прогресс: сборник докладов четвертой российской научно-практической конференции с международным участием / под ред. Ю.А. Лаврова. – Новосибирск, 2008. – С. 211–214.
4. Тарасов А.Г. Диагностика состояния подземной системы опор ВЛ 220–500 кВ: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02. – Новосибирск, 2005. – 21 с.
5. Арбузов Р.С., Овсянников А.Г. Современные методы диагностики воздушных линий электропередачи. – Новосибирск: Наука, 2009. – 137 с.
6. Овсянников А.Г., Борисов Р.К. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. – 196 с.
7. Бирюлин Г.В., Егоров В.И. Применение ЭВМ для решения задач теплопроводности: учебное пособие. – СПб.: СПб ГУ ИТМО, 2006. – 77 с.
8. Аполлонский С.М. Дифференциальные уравнения математической физики в электротехнике. – СПб.: Питер, 2012. – С. 231–243.
9. Прохоров А.М. Физическая энциклопедия. Т. 2. Добротность – Магнитооптика. – М.: Советская энциклопедия, 1990. – 703 с.
10. Афонин А.В., Таджибаев А.И., Титков В.В. Излучения в инфракрасном диапазоне волн и их измерения. – СПб.: ПЭИПК, 2007. – 120 с.
11. Кухлинг Х. Справочник по физике: пер. с нем. – 2-е изд. – М.: Мир, 1985. – 520 с.
12. Железко Ю.С., Артемьев А.В., Савченко О.В. Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях: руководство для практических расчетов. – М.: ЭНАС, 2004. – С. 48.
13. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: руководство для практических расчетов. – М.: ЭНАС, 2009. – С. 88–89.
14. Власов В.В., Сухар В.М. Опыт разработки, изготовления и проведения испытаний легких одноцепных и двухцепных промежуточных опор из композиционных материалов для высоковольтных линий 110–220 кВ для проведения аварийно-восстановительных работ и применения в труднодоступной местности // Линии электропередачи – 2012: проектирование, строительство, опыт эксплуатации и научно-технический прогресс: сборник докладов пятой научно-практической конференции с международным участием / под ред. Ю.А. Лаврова. – Новосибирск, 2012. – С. 149–158.
15. Патент 79310 U1 Российская Федерация, МПК E 04 H 12/08, E 04 H 12/10. Опора воздушной линии электропередачи / В.П. Дикой, А.Л. Ивановский, Н.М. Коробков, Р.А. Нечитаев, А.Г. Овсянников; заявитель и патентообладатель ОАО «НТЦ Электроэнергетики». – № 2008124902/22; заявл. 20.06.2008; опубл. 27.12.2008, Бюл. № 23 (II ч.). – 6 с.: ил.

*Овсянников Александр Георгиевич*, доктор технических наук, профессор кафедры техники и электрофизики высоких напряжений Новосибирского государственного технического университета. Основные направления научных исследований: физика газового разряда, диагностика электрооборудования. Имеет более 200 публикаций, в том числе 3 монографии и 4 учебных пособия. E-mail: oag@nspsb.ru

*Нечитаев Роман Александрович*, соискатель кафедры техники и электрофизики высоких напряжений Новосибирского государственного технического университета, действительный член Всемирной академии наук комплексной безопасности. Основное направление научных исследований – передача электрической энергии. Имеет 2 публикации. E-mail: 79232493333@ya.ru

**Induction power losses in overhead transmission line towers\***A.G. OVSYANNIKOV<sup>1</sup>, R.A. NECHITAEV<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, D. Sc. (Eng.), professor. E-mail: oag@nspsb.ru

<sup>2</sup> Novosibirsk State Technical University, a candidate for a PhD degree, department of high-voltage engineering and electrophysics, NSTU; a full member of the World Academy of Sciences for Complex Security, 99/7, Vybornaya St., Novosibirsk, 630126, Russia. E-mail: 79232493333@ya.ru

This paper discusses the problem of power losses in high-voltage overhead transmission lines. Special attention is paid to one kind of technological losses, which is still not given consideration in normative documents of the Russian Federation. These losses appear in line towers due to induction currents generated by their own magnetic fields formed by currents in transmission line conductors. Various inductive currents in different parts of transmission line towers are described. Values of inductive currents were measured in real transmission lines. Infrared images illustrate heating in some zones of tower structures. Physical processes are also studied based on thermodynamics and electrical engineering laws. Power losses are computed when induction currents flow in tower closed loops. Graphical solution is used in this computation. The annual induction power losses are calculated for the 500 kV overhead transmission line. In conclusion, alternative innovative approaches are proposed to minimize inductive current and power losses.

**Keywords:** power losses, overhead transmission line, induction, inductive current, temperature, heating, infrared image, excess temperature, first thermodynamics law

DOI: 10.17212/1814-1196-2016-2-129-140

**REFERENCES**

1. Prikaz Minenergo Rossii ot 30 dekabrya 2008 goda № 326 "Ob organizatsii v Ministerstve energetiki Rossiiskoi Federatsii raboty po utverzhdeniyu normativov tekhnologicheskikh poter' elektroenergii pri ee peredache po elektricheskim setyam" [Order of the Ministry of Energy of Russia from December, 30<sup>th</sup>, 2008 No. 326 "About organization in Ministry of Energy of the Russian Federation work to assigning of normative of technological losses of electrical energy transmitted by electrical grid"]. Moscow, 2008. 85 p.
2. Rutsikii V.M., Ovsyannikov A.G., Nechitaev R.A. [Power losses correction in elements of overhead transmission line]. *Linii elektropredachi – 2008: proektirovanie, stroitel'stvo, opyt ekspluatatsii i nauchno-tekhnicheskii progress: sbornik dokladov tret'ei rossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Power transmission line – 2008: planning, building, field experience and scientific and technological progress: proceedings of the Third Russian theoretical and practice conference with international participation]. Novosibirsk, 2008, pp. 220–225.
3. Anokhin A.Yu., Vedernikov I.P., Tarasov A.G. [Check of the contact resistance of tower vertical stay in overhead transmission line]. *Linii elektropredachi – 2010: proektirovanie, stroitel'stvo, opyt ekspluatatsii i nauchno-tekhnicheskii progress: sbornik dokladov chetvertoi rossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Power transmission line – 2010: planning, building, field experience and scientific and technological progress: Proceedings of the Fourth Russian theoretical and practice conference with international interest]. Novosibirsk, 2010, pp. 211–214.
4. Tarasov A.G. Diagnostika sostoyaniya podzemnoi sistemy opor VL 220–500 kV. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Diagnostics of underground system state of tower VL 220–500 kV. Author's abstract of PhD eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2005. 21 p.

---

\* Received 23 December 2015.

5. Arbuzov R.S., Ovsyannikov A.G. *Sovremennyye metody diagnostiki vozdukhnykh liniy elektropredachi* [Modern diagnostic methods of overhead transmission lines]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2009. 137 p.
6. Ovsyannikov A.G., Borisov R.K. *Elektromagnitnaya sovместimost' v elektroenergetike* [Electromagnetic compatibility in electroenergetics]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2010. 196 p.
7. Biryulin G.V., Egorov V.I. *Primenenie EVM dlya resheniya zadach teploprovodnosti* [Computer applying for solving of heat transfer tasks]. St. Petersburg, 2006. 77 p.
8. Apollonskii S.M. *Differentsial'nye uravneniya matematicheskoi fiziki v elektrotekhnike* [Differential equations of mathematical physics for electrical engineering]. St. Petersburg, Piter Publ., 2012, pp. 231–243.
9. Prokhorov A.M. *Fizicheskaya entsiklopediya. T. 2* [Physical encyclopaedia. Vol. 2]. Moscow, Sovetskaya entsiklopediya Publ., 1990. 703 p.
10. Afonin A.V., Tadzhibaev A.I., Titkov V.V. *Izlucheniya v infrakrasnom diapazone voln i ikh izmereniya* [Radiations in infrared wave and their measurements]. St. Petersburg, PEIPK Publ., 2007. 120 p.
11. Kuchling H. *Physik. 15. Aufl.* Leipzig, Fachbuchverl, 1980. 553 p. (Russ. ed.: Kuchling Kh. *Spravochnik po fizike*. Translated from German. Moscow, Mir Publ., 1985. 520 p.).
12. Zhelezko Yu.S., Artem'ev A.V., Savchenko O.V. *Raschet, analiz i normirovanie poter' elektroenergii v elektricheskikh setyakh: rukovodstvo dlya prakticheskikh raschetov* [Calculation, analysing and normalization power losses in electrical grid: book for practice]. Moscow, ENAS Publ., 2004, p. 48.
13. Zhelezko Yu.S. *Poteri elektroenergii. Reaktivnaya moshchnost'. Kachestvo elektroenergii: rukovodstvo dlya prakticheskikh raschetov* [Electric loss. Reactive power. Power quality: book for practice]. Moscow, ENAS Publ., 2004, pp. 88–89.
14. Vlasov V.V., Sukhar V.M. [Working out, producing and checking experience of light single- and twin-circuit tower of high-voltage transmission line 110–220 kV for special work]. *Linii elektropredachi – 2012: proektirovanie, stroitel'stvo, opyt ekspluatatsii i nauchno-tekhnicheskii progress: sbornik dokladov pyatoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Power transmission line – 2012: planning, building, field experience and scientific and technological progress: proceedings of the Fifth Russian theoretical and practice conference with international interest]. Novosibirsk, 2012, pp. 149–158.
15. Dikoi V.P., Ivanovskii A.L., Korobkov N.M., Nechitaev R.A., Ovsyannikov A.G. *Opora vozdukhnoi linii elektropredachi* [Overhead transmission line tower]. Patent RF, no. 79310, 2008.