

УДК 621.311

## Анализ индукционных потерь энергии в опорах воздушных линий электропередачи 500 кВ\*

Р.А. НЕЧИТАЕВ

630126, РФ, г. Новосибирск, ул. Выборная, 99/7, соискатель кафедры техники и электрофизики высоких напряжений Новосибирского государственного технического университета. E-mail: [mangerok@mail.ru](mailto:mangerok@mail.ru), [79232493333@ya.ru](mailto:79232493333@ya.ru)

Статья связана с технологическими потерями электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям. Существуют потери, которые появляются из-за индуцированных токов, формируемых собственными магнитными полями от токов в проводах линии. Выполнен аналитический расчет индукционной потери энергии в опорах воздушной линии электропередачи класса напряжения 500 кВ (далее ЛЭП-500) на основе физически обоснованной закономерности. В программной среде Comsol Multiphysics в графическом интерфейсе вычислены значения потокоцепления в замкнутых контурах промежуточной порталльной опоры на оттяжках (далее ППОО), с помощью которых определены величины ЭДС-взаимоиндукции. Приведена электрическая схема замещения конструкции ППОО и рассчитаны ее активные, индуктивные и комплексные сопротивления распространению электромагнитной волны промышленной частоты, найдено решение для нахождения индукционной потери энергии и потери напряжения в опоре. Особое внимание уделено расчету электромагнитных величин в системе соединений элементов ППОО для полной линии, построен график зависимости вероятностной величины индукционной потери энергии от среднего сопротивления ее контактов. Составлена принципиальная схема замещения и выполнен расчет ЛЭП-500 с учетом индуцированных токов в ее конструкции, результатом которого являются векторная диаграмма токов и напряжений и график зависимости вероятностной величины индукционной потери энергии от токовой нагрузки линии в сравнении с потерей в проводе. Приводится решение для снижения потерь электроэнергии и повышения пропускной способности воздушной линии (далее ВЛ) с ППОО, обсуждаются его преимущества и недостатки. В заключении сравниваются полученные величины индукционной потери энергии с нормативными значениями.

**Ключевые слова:** порталльная опора на оттяжках, индуцированное напряжение, контактное сопротивление, самоиндукция, индукционная потеря энергии, математическое ожидание, расчет ЛЭП, годовые потери энергии, физическая величина

DOI: 10.17212/1814-1196-2017-3-158-171

### ВВЕДЕНИЕ

Процесс производства, передачи и потребления электроэнергии является единым, непрерывным и связан с движением энергии электромагнитного поля. Воздушная ЛЭП состоит из проводов и изолирующей их на безопасном

---

\* Статья получена 17 мая 2017 г.

расстоянии строительной конструкции. В качестве строительной конструкции ВЛ применяется ферма или просто опора. Опоры по действующим на них механическим нагрузкам подразделяются на анкерные, сосредоточивающие на себе усилия во всех пространственных направлениях, и промежуточные, свободно стоящие в пространстве, выполняющие в основном только поддержку провода от провисания по вертикали. Каждая ВЛ при проектировании и эксплуатации требует индивидуального подхода. ЛЭП-500 имеет огромное значение в российской энергосистеме, их используют для усиления основной сети, а также для развития межсистемных связей. В 2012 году протяженность ВЛ 500 кВ магистральных электрических сетей Сибири составляла 6831.94 км, в 2014 году эта цифра достигла уже 8167.04 км. Львиную долю (80...90 %) в общем количестве опор ЛЭП-500 занимают ППОО типа ПБ-500 (рис. 1, а).

На протяжении длительного периода в строительстве ВЛ применялись металлические фермы, обладающие преимуществами прочности, упругости и долговечности. Однако не сложно убедиться, что в металлических элементах конструкций опор ВЛ протекают токи, индуцируемые переменным током в фазных проводах. Индукционные токи вызывают нагрев элементов опор, что приводит к усилению реакции электрохимической коррозии и снижению надежности конструкции [1, 2, 3], а также являются потерями электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям [4]. На рис. 1, б приведена термограмма (инфракрасное изображение), показывающая области с избыточной температурой.

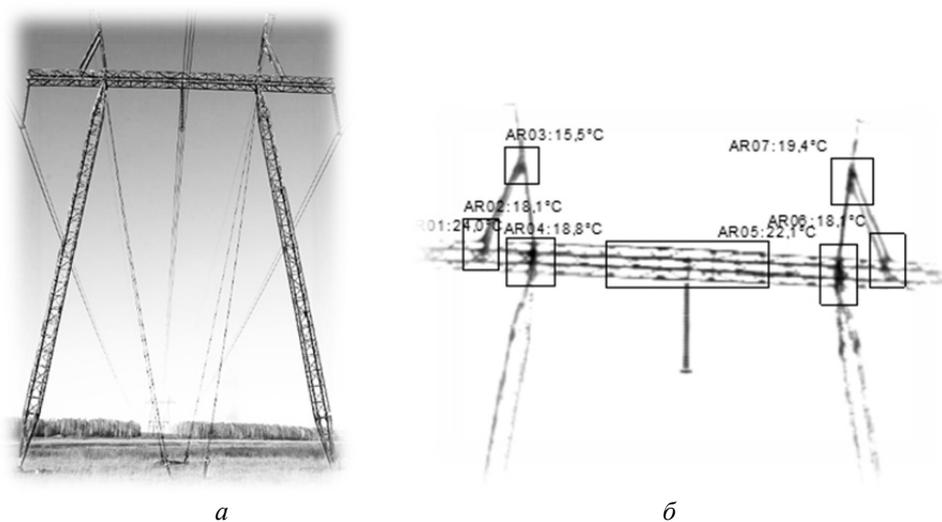


Рис. 1. Внешний вид ППОО типа ПБ-500 (а) и ее инфракрасное изображение (б)

В работе [5] обсуждались технологические потери от индуцированных токов, рассчитанные на основе уравнения теплового баланса по экспериментальным данным, результаты которых показали, что опоры ВЛ необходимо рассматривать как электротехнический элемент, а не как строительную конструкцию. В настоящей статье выполняется аналитический расчет потерь электроэнергии в ППОО по электротехническим законам. Производится расчет ЛЭП-500 с учетом индуктивности ее конструкции.

## АНАЛИЗ ИНДУКЦИОННЫХ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ В ОПОРАХ ЛЭП-500

Расчет ЛЭП позволяет определять пропускную способность, величину технологических потерь на передачу электрической энергии, возможные варианты установки устройств компенсации реактивной мощности для повышения ее энергоэффективности и другое.

Величины индуцированных напряжений в замкнутых контурах опор определяются только расчетным путем, для чего необходимо вычислить производные потокоцепления в каждом контуре:

$$E(t) = -\partial\psi / \partial t. \quad (1)$$

Вычисление магнитных потоков в контурах путем математического интегрирования произведения вектора магнитной индукции по замкнутой поверхности  $B \cdot dS$  ведет к дроблению контуров, усложнению задачи и погрешности. С появлением численных методов моделирования с применением графического интерфейса сложные процессы интегрирования остаются в прошлом. В табл. 1 показаны значения индуцированных напряжений в замкнутых контурах (рис. 2, а), найденных по формуле (1), с применением программной среды Comsol Multiphysics [6], а на рис. 2, б – вебер-амперные и вольт-амперные характеристики этих контуров [7].

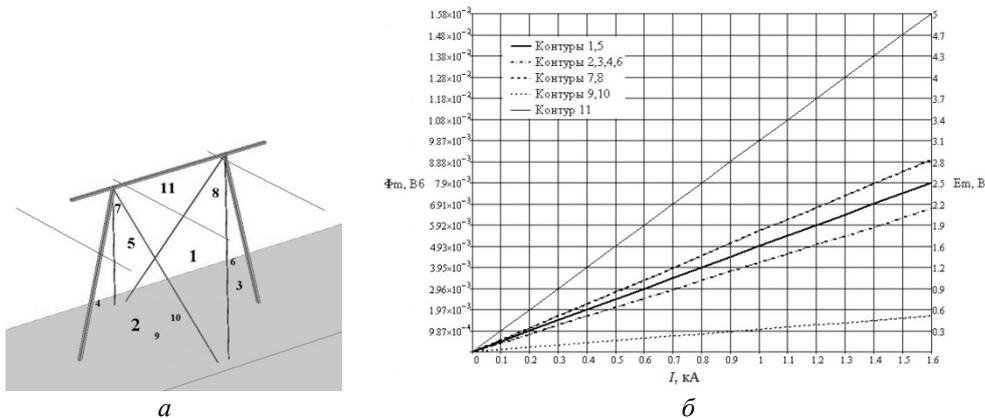


Рис. 2. Компьютерная модель ППОО (а); вебер- и вольт-амперная характеристика ее контуров (б)

Таблица 1

Значение ЭДС-взаимоиндукции в контурах при значениях тока ВЛ 1 кА

Номер контура	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$E_M, B$	1.55	1.3	1.3	1.3	1.55	1.3	1.77	1.77	0.3	0.3	3.1

В контуры 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10 входит участок с сопротивлением грунта, поэтому при индуцированном напряжении величиной порядка одного вольта индукционный ток и его квадратичное значение окажется пренебрежимо малым, и практического интереса они не представляют, а контуры 1, 5 или 11

имеют металlosвязь. Электрическая схема замещения ППОО представлена на рис. 3, где  $R_U$  – сопротивление контактов крепления оттяжек внизу, Ом;  $R_3$  – сопротивление участка грунта между стойкой опоры и анкерной плитой, Ом;  $R_{OT}$  – сопротивление контакта крепления оттяжки вверх, Ом;  $R_{оп}$  – сопротивление контакта соединения траверсы со стойкой опоры, Ом;  $X_M$  – сопротивление взаимоиндукции контуров 1 и 5 с проводами ВЛ, Ом;  $X_{15}$ ,  $X_{11}$  – сопротивление самоиндукции контуров 1, 5 и 11, Ом.

Коэффициент взаимоиндукции контуров и проводов ВЛ  $M$  можно определить по вебер-амперной характеристике, показанной на рис. 2, б. Индуктивность контуров может быть определена по их геометрическим размерам по общей формуле для нахождения индуктивностей плоских контуров [8]:

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left( \ln \frac{2S}{rl} - 0,15 + \frac{\mu}{\mu_0} \frac{\xi}{4} \right), \quad (2)$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная,  $l$  – периметр контура,  $S$  – охватываемая контуром площадь,  $r$  – радиус сечения троса оттяжки,  $\mu$  – магнитная проницаемость проводника контура,  $\xi = 0$  – значение, определяемое по таблице.

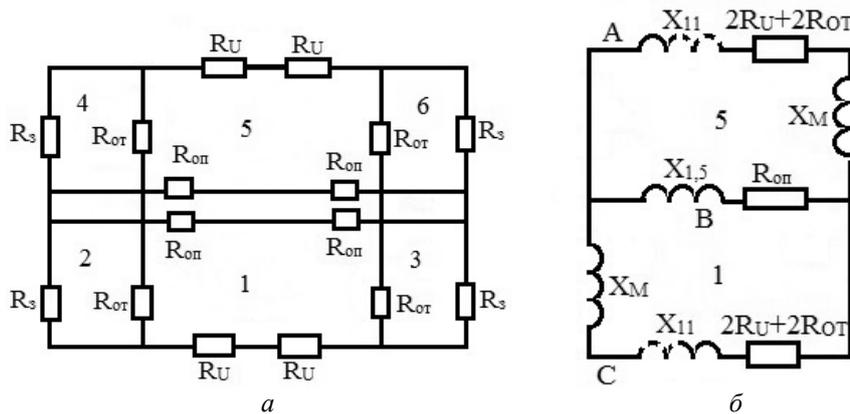


Рис. 3. Электрическая схема замещения ППОО с активными сопротивлениями (а) и эквивалентная ей схема с индуктивностью контуров (б)

Для контуров 1 и 5, имеющих форму равнобедренного треугольника с периметром 75,5 м, площадью 187,2 м<sup>2</sup>, диаметром троса оттяжки 1,5 см, индуктивность равна 95 мкГн. Однако в данной задаче индукционный ток замыкается по контуру 11, так как через среднюю ветвь он противоположен по направлению и в сумме равен нулю. Индуктивность большого контура с периметром 128 м и площадью 374,4 м<sup>2</sup> равна 169 мкГн.

Расчет схемы необходимо выполнить, используя принцип наложения, для ЭДС-взаимоиндукции каждого контура в отдельности.

$$M \frac{di}{dt} = ri_{in} + L \frac{di_{in}}{dt}, \quad (3)$$

где  $M$  – коэффициент взаимной индуктивности контуров 1 и 5, Гн;  $i$  – ток ВЛ, А;  $i_{in}$  – индукционный ток в контуре ППОО, А;  $r$  – сопротивление контура, Ом;  $L$  – индуктивность контура, Гн.

Индукционная потеря энергии в ППОО равна суммарной тепловой энергии, выделяемой на ее активных сопротивлениях.

$$P_{\text{ППОО}} = I_A^2 R_A + I_B^2 R_B + I_C^2 R_C, \quad (4)$$

где  $P_{\text{ППОО}}$  – индукционная потеря энергии в ППОО, Вт;  $I_A, I_B, I_C$  – действующее значение суммарного индукционного тока в ветви  $A, B, C$  соответственно, А;  $R_A = 2(R_U + R_{OT})$ ,  $R_B = R_{OP}$ ,  $R_C = 2(R_U + R_{OT})$  – активное сопротивление ветви  $A, B, C$  соответственно, Ом.

Индукционные токи в ветвях находятся по законам Кирхгофа в комплексной форме:

$$\bar{I}_A = \frac{\bar{E}_5}{Z_A(\text{пр})} + \frac{\bar{E}_1}{Z_A(\text{обр})}; \quad (5)$$

$$\bar{I}_C = \frac{\bar{E}_1}{Z_C(\text{пр})} + \frac{\bar{E}_5}{Z_C(\text{обр})}; \quad (6)$$

$$\bar{I}_B = \frac{\bar{E}_1}{Z_B(\text{пр})} - \frac{\bar{E}_5}{Z_B(\text{обр})}, \quad (7)$$

где  $\bar{E}_1, \bar{E}_5$  – комплексная ЭДС-взаимоиндукции в контурах 1 и 5 соответственно, В;  $Z_A(\text{пр}) = R_A + Z_B Z_C / (Z_B + Z_C)$  – прямое сопротивление ветви  $A$ , Ом;  $Z_A(\text{обр}) = (R_C Z_A + R_C Z_B + Z_A Z_B) / Z_B$  – обратное сопротивление ветви  $A$ , Ом;  $Z_B(\text{пр}) = (R_C Z_A + R_C Z_B + Z_A Z_B) / Z_A$  – прямое сопротивление ветви  $B$ , Ом;  $Z_B(\text{обр}) = (R_A Z_B + R_A Z_C + Z_B Z_C) / Z_C$  – обратное сопротивление ветви  $B$ , Ом;  $Z_C(\text{пр}) = R_C + Z_A Z_B / (Z_A + Z_B)$  – прямое сопротивление ветви  $C$ , Ом;  $Z_C(\text{обр}) = (R_A Z_B + R_A Z_C + Z_B Z_C) / Z_B$  – обратное сопротивление ветви  $C$ , Ом;  $Z_A = R_A + jX_{11}$ ,  $Z_B = R_B + jX_{1,5}$ ,  $Z_C = R_C + jX_{11}$  – комплексные сопротивления ветвей  $A, B, C$  соответственно, Ом.

Приблизительная величина комплексного сопротивления ППОО определена по экспериментальным данным, согласно которым при токе на линии 500 А индукционный ток во всех оттяжках равен 6 А.

$$|Z_{\text{ППОО}}| = \frac{|X_M I|}{|I_{\text{инд}}|} = \frac{1,55 \cdot 0,5}{6} = 0,13 \text{ Ом}, \quad (8)$$

где  $I$  – действующее значение тока ВЛ, А;  $I_{\text{инд}}$  – действующее значение индукционного тока в оттяжках, А.

Анализируя (3)–(8), находим среднее контактное сопротивление соединений оттяжек  $R_U = R_{OT} = R = 33$  мОм и большее сопротивление соединений элементов опоры  $R_{OP} = 0.66$  Ом:

$$Z_A(\text{пр}) = R_A + \frac{Z_B Z_C}{Z_B + Z_C} = 0.244 + j0.037 = 0.246e^{j8.5} \text{ Ом}; \quad (9)$$

$$Z_A(\text{обр}) = (R_C Z_A + R_C Z_B + Z_A Z_B) / Z_B = 0.291 + j0.062 = 0.297e^{j12} \text{ Ом}; \quad (10)$$

$$Z_{\text{ППОО}} = \frac{Z_{A,C}(\text{пр}) \cdot Z_{A,C}(\text{обр})}{Z_{A,C}(\text{пр}) + Z_{A,C}(\text{обр})} = 0.132 + j0.023 = 0.135e^{j10} \text{ Ом}. \quad (11)$$

Безусловно, такое идеализированное представление о величинах контактных сопротивлений ППОО не может быть принято без оговорки на реальное распределение индуцированных токов, так как абсолютные значения  $R_U$ ,  $R_{OT}$ ,  $R_{OP}$  в ЛЭП-500 с большим сроком эксплуатации естественно несколько отличаются от подобных себе, поэтому измеренные токи в оттяжках немного расходятся по величине. Статистика результатов измерений наведенных токов показывает, что в 30 % случаев большим контактным сопротивлением обладает подземный анкерный узел  $R_U$ , в 60 % – соединения опоры  $R_{OP}$ , и только 10 % остаются в рабочем состоянии [9, с. 211–214].

Результаты вычислений по уравнениям (3)–(11) и их математическое ожидание сведены в табл. 2.

Таблица 2

## Вероятностная величина индукционной потери энергии в ППОО

Вероятность	$I$ , кА	$E_{1,5}$ , В	$R_A$ , Ом	$R_B$ , Ом	$R_C$ , Ом	$Z_{A,C}(\text{пр})$ , Ом	$Z_{A,C}(\text{обр})$ , Ом	$P_{\text{ППОО}}$ , Вт
60 %	0.7	1.1	0.132	>0.3	0.132	$0.244 + j0.037$	$0.291 + j0.062$	17
10 %	0.7	1.1	0.132	0.033	0.132	$0.159 + j0.021$	$0.659 - j0.094$	18.4
30 %	0.7	1.1	0.132	0.033	>0.3	$0.165 + j0.029$	$6.715 - j1.781$	7
$M(P_{\text{ППОО}})$	0.7	–	–	–	–	–	–	14.14

Несложно убедиться, что увеличение  $R_{OP}$  не приводит к значительному влиянию на токораспределение в ППОО, а при большом сопротивлении одного из креплений к анкерному болту  $R_U$  результат будет отличаться максимум в два раза – индукционный ток замкнется по контуру с меньшим сопротивлением (1 или 5). График зависимости индукционной потери энергии от среднего сопротивления контакта опоры приведен на рис. 4.

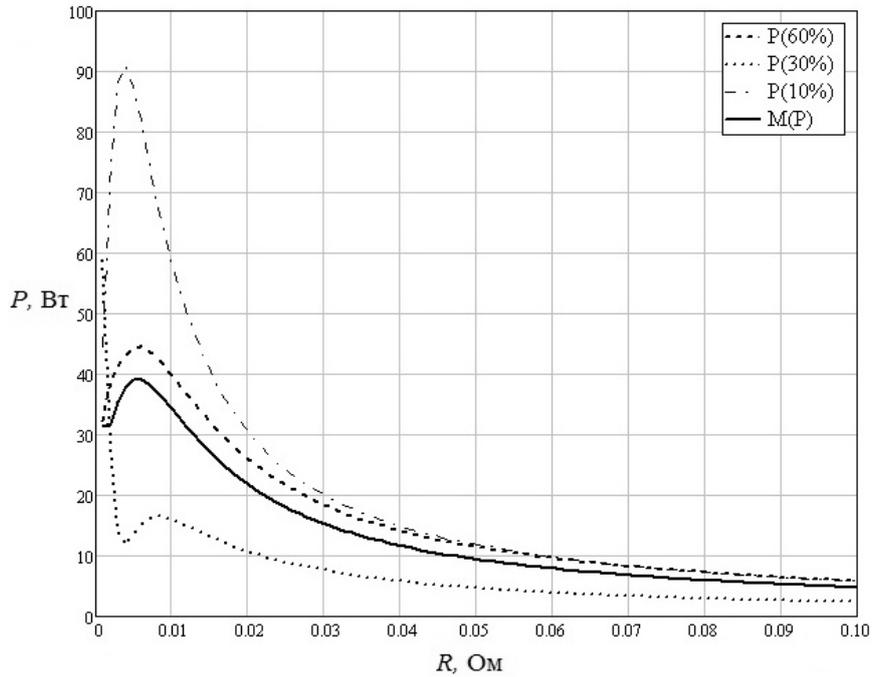


Рис. 4. Зависимость вероятностной величины индукционной потери энергии в ППОО от средней величины ее контактного сопротивления

Индукционные потери энергии являются квадратичной функцией силы тока, поэтому при расчетах необходимо учитывать изменение нагрузки в течение суток. Поскольку ЛЭП-500 является системообразующей линией, то для общего расчета можно принять время наибольших потерь ТНБ с 8-00 до 22-00, а наименьших ТНМ с 22-00 до 8-00. Допустим, для регионов Сибири максимальная нагрузка на ЛЭП-500 составляет 700 А, а минимальная – 460 А. Тогда наибольшие и наименьшие удельные индукционные потери для одной опоры с вероятностью 0.6 определяются по величине теряемой тепловой энергии:

$$P_{\text{уд\_НБ}}(0.6) = 2 \left( \frac{X_M I_{\text{НБ}}}{|Z_{\text{ППОО}}|} \right)^2 R_{A,C} = 2(1.55 \cdot 0.700/0.135)^2 0.132 = 17 \text{ Вт}, \quad (12)$$

$$P_{\text{уд\_НМ}}(0.6) = 2 \left( \frac{X_M I_{\text{НМ}}}{|Z_{\text{ППОО}}|} \right)^2 R_{A,C} = 2(1.55 \cdot 0.46/0.135)^2 0.132 = 7.4 \text{ Вт}. \quad (13)$$

Для всей линии дальнейший расчет целесообразнее выполнить по величине математического ожидания  $M(P)$  индукционной потери энергии, которая при максимальной нагрузке составляет 14.14 Вт (табл. 2) и при минимальной 6.1 Вт.

Одним из способов учета индукционной потери энергии может служить метод интервалов по количеству часов использования нагрузки:

$$W_{\text{уд\_НБ}} = P_{\text{уд\_НБ}} \cdot T_{\text{НБ}} = 14.14 \cdot 14 = 0.198 \text{ кВт} \cdot \text{ч}; \quad (14)$$

$$W_{УД\_НМ} = P_{УД\_НМ} \cdot T_{МБ} = 6.1 \cdot 10 = 0.061 \text{ кВт} \cdot \text{ч}. \quad (15)$$

В некоторых случаях удобно использовать среднесуточное значение:

$$P_{УД\_СР} = (W_{УД\_НБ} + W_{УД\_НМ}) / 24 = 259 / 24 = 10.8 \text{ Вт}. \quad (16)$$

$$I_{СР} = Z_{ППОО} \sqrt{P_{УД\_СР} / R_{ППОО}} / X_M = 0.13 \sqrt{10.8 / 2 \cdot 0.132} / 0.00155 = 550 \text{ А}. \quad (17)$$

Тогда годовые потери энергии в ППОО можно определить по среднесуточному значению удельной индукционной потери энергии:

$$W_{УД\_ГОД} = P_{УД\_СР} \cdot T_{ГОД} = 10.8 \cdot 8760 = 94.9 \text{ кВт} \cdot \text{ч}. \quad (18)$$

Для ЛЭП-500 с числом промежуточных опор  $N = 1150$  суммарные потери мощности по (12)–(18) возрастут пропорционально.

$$P_{ЛЭП\_НБ} = \sum_{i=1}^N P_{УД\_НБ} = P_{УД\_НБ} \cdot N = 14.14 \cdot 1150 = 16,26 \text{ кВт}; \quad (19)$$

$$P_{ЛЭП\_НМ} = \sum_{i=1}^N P_{УД\_НМ} = P_{УД\_НМ} \cdot N = 6.1 \cdot 1150 = 7 \text{ кВт}; \quad (20)$$

$$W_{ЛЭП\_НБ} = P_{ЛЭП\_НБ} \cdot T_{НБ} = 16.26 \cdot 14 = 227 \text{ кВт} \cdot \text{ч}; \quad (21)$$

$$W_{ЛЭП\_НМ} = P_{ЛЭП\_НМ} \cdot T_{НМ} = 7 \cdot 10 = 70 \text{ кВт} \cdot \text{ч}; \quad (22)$$

$$P_{ЛЭП\_СР} = (W_{ЛЭП\_НБ} + W_{ЛЭП\_НМ}) / 24 = 297 / 24 = 12.37 \text{ кВт}; \quad (23)$$

$$W_{ЛЭП\_ГОД} = P_{ЛЭП\_СР} \cdot T_{ГОД} = 12.37 \cdot 8760 = 108.4 \text{ тыс. кВт} \cdot \text{ч}. \quad (24)$$

Потеря напряжения в индуктивных конструкциях ВЛ определится алгебраической суммой их ЭДС-взаимоиндукции. При среднесуточной силе тока ВЛ 550 А ЭДС-взаимоиндукции в ППОО составляет 1.7 В, т. е. для ЛЭП-500 с числом ППОО  $N = 1150$  потеря напряжения составит 1960 В.

$$\Delta U_M = \sum_{i=1}^N E_{Mi} = E_M \cdot N = 1.7 \cdot 1150 = 1960 \text{ В}. \quad (25)$$

Далее приведены расчет ЛЭП-500 длиной  $L = 470$  км, что соответствует числу ППОО  $N = 1150$ , и ее векторная диаграмма с использованием работы [10].

Схема замещения ЛЭП-500 с ППОО показана на рис. 5.

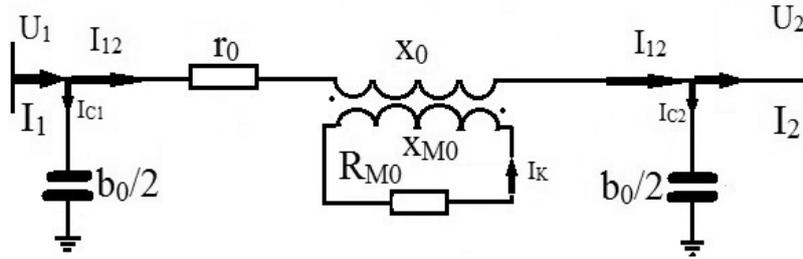


Рис. 5. Схема замещения ЛЭП-500 с ППОО

В конце ЛЭП-500 на шинах поддерживается номинальное напряжение и потребляется ток индуктивного характера:  $U_{2Л} = 500$  кВ,  $I_2 = 700e^{-j10}$  А.

Комплексное сопротивление и емкостная проводимость фазного провода АС – 3×400/51:  $Z_{П} = 11.4 + j143.8$  Ом,  $b_0 = 3.623 \cdot 10^{-6}$  См/км.

Продольное суммарное сопротивление взаимоиндукции половины ППОО ЛЭП-500:  $X_K = 2X_M \cdot 1150 = 3.56$  Ом.

Продольные суммарные полное и активное сопротивления половины ППОО ЛЭП-500:  $Z_K = Z_{ППОО} \cdot 1150 = 155.25e^{j10}$  Ом,  $R_K = R_{A,C} \cdot 1150 = 151.8$  Ом.

Зарядный ток в конце ЛЭП-500

$$I_{C2} = jb_0LU_{2Л}/2\sqrt{3} = j3.623 \cdot 10^{-6} \cdot 470 \cdot 500/2\sqrt{3} = j246 \text{ А.} \quad (26)$$

Ток ЛЭП-500

$$I_{12} = I_2 + I_{C2} = 689 + j123 = 700e^{j10} \text{ А.} \quad (27)$$

Потери энергии в проводе ЛЭП-500

$$P = 3 \cdot |I_{12}|^2 \cdot \text{Re}(Z_{П}) = 16.76 \text{ МВт.} \quad (28)$$

Падение напряжения в конструкции ЛЭП-500

$$\Delta U_K = -j \cdot X_K \cdot I_{12} = 0.42 - j2.46 = 2.5e^{j280} \text{ кВ.} \quad (29)$$

Ток в конструкции ЛЭП-500

$$I_K = \Delta U_K / Z_K = -j8 = 8e^{j270} \text{ А.} \quad (30)$$

Падение напряжения в фазе ЛЭП-500

$$\Delta U_{П} = I_{12}Z_{П} = 100.9e^{j95.5} = -9.67 + j100.43 \text{ кВ.} \quad (31)$$

Падение напряжения в ЛЭП-500

$$\Delta U = \Delta U_{\Pi} + 2\Delta U_{\text{К}} = -9.23 + j98 \text{ кВ.} \quad (32)$$

Напряжение в начале ЛЭП-500

$$U_{1\Phi} = U_{2\Phi} + \Delta U = 279.4 + j98 = 296e^{j19.3} \text{ кВ.} \quad (33)$$

Напряжение в начале ЛЭП-500 без учета ЭДС-взаимоиндукции

$$U'_{1\Phi} = U_{2\Phi} + \Delta U_{\Pi} = 279 + j100.43 = 296.5e^{j19.8} \text{ кВ.} \quad (34)$$

Зарядный ток в начале ЛЭП-500

$$I_{C1} = jb_0LU_{1\Phi}/2 = -83 + j237 = 251e^{j109.3} \text{ А.} \quad (35)$$

Ток в начале ЛЭП-500

$$I_1 = I_{12} + I_{C1} = 606 + j360 = 704.9e^{j30.7} \text{ А.} \quad (36)$$

Потери энергии в конструкции ЛЭП-500

$$P_{\text{К}} = 2I_{\text{К}}^2 R_{\text{К}} = 19.43e^{j180} = -19.43 + j0 \text{ кВт.} \quad (37)$$

Важным свойством ЛЭП-500 является пропускная способность. По результатам расчетов (26)–(36) построена векторная диаграмма токов и напряжений, приведенная на рис. 6, из которой видно, что угол по электропередаче  $\delta$  отличается на  $\delta'$ , поэтому разница наибольшей пропускной способности воздушной ЛЭП определится из отношения синусов углов электропередачи. В рассматриваемом примере разница модулей напряжений (33), (34) отличается на 0,16 %, а синусов углов электропередачи – на 2,5 %.

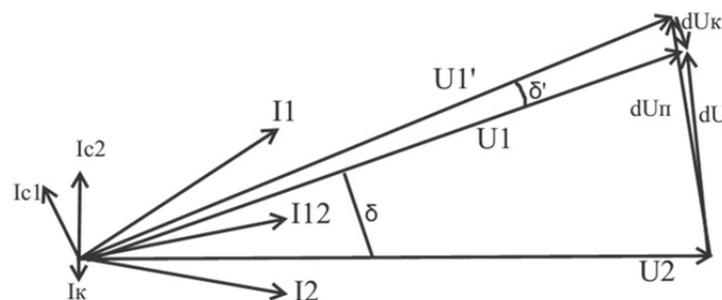


Рис. 6. Векторная диаграмма токов и напряжений ЛЭП-500

Отношение технологических потерь электроэнергии в ППО к потерям в проводе ВЛ составляет 0,11 %, на рис. 7 приведена зависимость потери энергии от тока нагрузки ЛЭП-500.

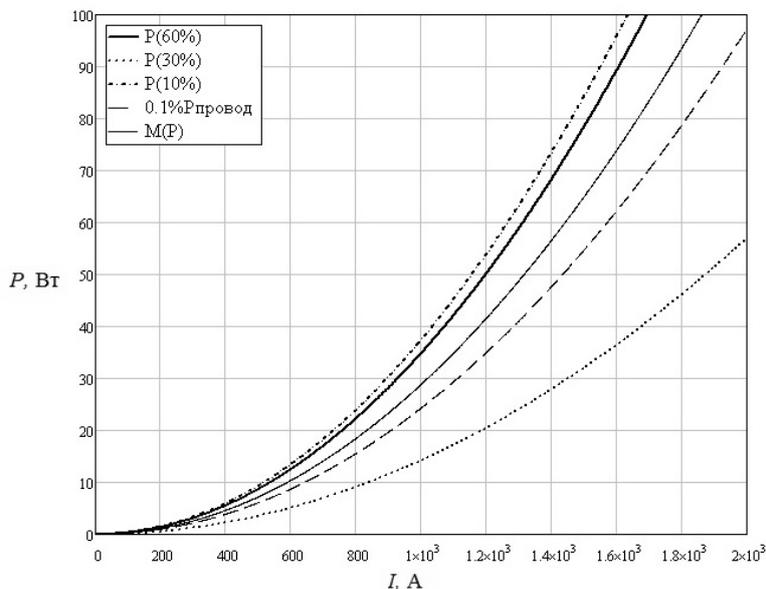


Рис. 7. Зависимость вероятностной величины индукционной потери энергии в ППОО от тока нагрузки

Таким образом, устранение индуктивных связей в ППОО, что возможно реализовать, используя полезную модель [11], повысит наибольшую пропускную способность ВЛ на 2,7 %, причем технологические потери электроэнергии при ее передаче снизятся на 0,11 %. Однако изменение вектора напряжения вдоль линии больше без индуктивной привязки к конструкции ВЛ, поэтому эксплуатация ЛЭП-500 на безындуктивных опорах потребует установки управляемого шунтирующего реактора или других устройств компенсации реактивной мощности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Виртуальный мир с каждым годом всё больше и больше захватывает воображение людей. Компьютерное обеспечение позволяет отслеживать, рассчитывать и управлять потоками интеллектуальной энергии. Неограниченные возможности виртуального мира позволяют создавать 3D-визуализацию с записанными в память компьютера физическими и химическими свойствами, известными науке закономерностями и вычислять требуемые для жизни значения, но не величины. Величина имеет видимые физические границы, а значение показывает лишь результат математического действия.

В данной статье предложен новый метод расчета мощности и энергии в силовом элементе электрической сети по инновационной формуле, в которой при вычислениях использованы величина контактного сопротивления, полученная экспериментальным путем, и величина ЭДС-взаимоиндукции, вычисленная на лицензионном программном обеспечении НГТУ.

В результате получена видимая граница достижения показателей по снижению потери энергии на 0,11 % и повышению наибольшей пропускной способности электропередачи на 2,7 % для ЛЭП-500, которая необходима для выполнения стратегических задач электроэнергетической отрасли. – «Еже-

годное снижение потерь электроэнергии на несколько десятых процента в сетях снимает необходимость строительства целого блока атомной станции... инвестируя в сети, мы сберегаем ресурсы генерации» [12, 13].

Суммарная величина потери энергии за годовой период рассматриваемой ВЛ составит 108.4 тыс. кВт · ч при нормативных в соединительных проводах и сборных шинах подстанций 500 кВ – 415 тыс. кВт · ч [14].

На самом деле мы всегда находимся в достигнутой точке, и планирование без опоры на достигнутый уровень показателя лишено практической основы. Экономически обоснованный уровень является перспективной целью, однако шаги по его достижению будут всегда планироваться от достигнутого уровня [15].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Тарасов А.Г.* Диагностика состояния подземной системы опор ВЛ 220–500 кВ: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02. – Новосибирск, 2005. – 21 с.
2. *Арбузов Р.С., Овсянников А.Г.* Современные методы диагностики воздушных линий электропередачи. – Новосибирск: Наука, 2009. – 137 с.
3. *Овсянников А.Г., Борисов Р.К.* Электромагнитная совместимость в электроэнергетике. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. – 196 с.
4. *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.
5. *Овсянников А.Г., Нечитаев Р.А.* Индукционные потери энергии в опорах воздушной линии электропередачи // Научный вестник НГТУ. – 2016. – № 2 (63). – С. 129–140. – doi: 10.17212/1814-1196-2016-2-129-140.
6. *Егоров В.И.* Применение ЭВМ для решения задач теплопроводности: учебное пособие. – СПб.: СПб ГУ ИТМО, 2006. – 77 с.
7. *Нечитаев Р.А.* Опора воздушной линии электропередачи // Наука. Технологии. Инновации: сборник научных трудов: в 9 ч. / под ред. О.В. Боруш. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – Ч. 4. – С. 40–42.
8. *Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А.* Расчет индуктивностей: справочная книга. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – С. 192.
9. *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, 2010. – С. 211–214.
10. *Лыкин А.В.* Электрические системы и сети: учебник. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. – 363 с.
11. Патент 79310 U1 Российская Федерация, МПК Е 04 Н 12/08, Е 04 Н 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.
12. Путь от магистранта до профессора / под ред. В.П. Горелова. – Новосибирск: Изд-во Сиб. гос. ун-та водн. трансп., 2015. – 571 с.
13. *Кравченко В.М.* Самое ценное качество в электроэнергетике – незаметность: интервью директора Департамента развития электроэнергетики Минпромэнерго России / записала О. Филатова // Единая сеть. – 2008. – № 16 (53), апрель. – С. 11.

14. 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.

15. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: руководство для практических расчетов. – М.: ЭНАС, 2009. – С. 24.

*Нечитаев Роман Александрович, соискатель кафедры техники и электрофизики высоких напряжений Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – техническая диагностика и потери энергии. Имеет 4 публикации. E-mail: 79232493333@yandex.ru*

### ***Analysis of induction power losses in 500 kV overhead transmission line towers\****

*R.A. NECHITAEV*

*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 presents a method of power losses correction in the elements of a 500 kV high-voltage overhead transmission lines. Revealing transmission losses is not an easy task. The point is that the transmission line current causing a magnetic field which induces current in a portal-type tower with a stay. The current flowing in the tower produces heating of the components having high transient resistance. There are induction power losses. This technological loss has not been rated in normative documents of the Russian Federation yet; therefore special attention is paid to calculating methods of the power value. The formula used for calculating induction power losses has a physical basis [5]. It is true that much effort is directed toward the solution of the simulation problem. Computer simulation is based on applying Comsol Multiphysics licensed by NSTU. Graphical solution is employed in this computation. The simulation is performed to define the nature of the magnetic field around the power transmission line and to calculate voltages and currents induced in the loops of the portal type tower with stay. Especially the tower energy losses are calculated for power line fully, as the function of average contact resistance. The annual induction energy losses are calculated for 500 kV overhead transmission line intermediate portal type towers with a stay and alternative developments are proposed to minimize power losses and to gain economic benefits by 0,11 percent of wire losses. Also, the maximum overhead transmission line flow capacity is recalculated, which makes it possible to increase this parameter by 2, 7 percent of the natural power. An illustrated vector diagram of the computed values and a plot of a probable induction power loss depending on the overhead transmission line current are given. In conclusion, the result is compared with a normative value of a 500 kV substation.

**Keywords:** Portal type tower with a stay; induction voltage; contact resistance; self-induction, induction energy loss, mathematical expectation, calculating overhead transmission line, power losses analysis, physical quantity

DOI: 10.17212/1814-1196-2017-3-158-171

---

\* Received 17 May 2017.

## REFERENCES

1. 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.
2. Arbuzov R.S., Ovsyannikov A.G. *Sovremennye metody diagnostiki vozdukhnykh linii elektropredachi* [Modern diagnostic methods of overhead transmission lines]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2009. 137 p.
3. Ovsyannikov A.G., Borisov R.K. *Elektromagnitnaya sovместimost' v elektroenergetike* [Electromagnetic compatibility in electroenergetics]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2010. 196 p.
4. Rutskiy 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. (In Russian).
5. Ovsyannikov A.G., Nechitaev R.A. Induktsionnye poteri energii v oporakh vozdukhnoi linii elektropredachi [Induction power losses in overhead transmission line towers]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2016, no. 2 (63), pp. 129–140. doi: 10.17212/1814-1196-2016-2-129-140.
6. Egorov V.I. *Primenenie EVM dlya resheniya zadach teploprovodnosti* [Computer applying for solving of heat transfer tasks]. St. Petersburg, ITMO University Publ., 2006. 77 p.
7. Nechitaev R.A. [Overhead transmission line tower]. *Nauka. Tekhnologii. Innovatsii*. Sbornik nauchnykh trudov: v 9 ch. [Science. Technology. Innovation. Scientific work book: in 9 pt.]. Novosibirsk, 2016, pt. 4, pp. 40–42. (In Russian).
8. Kalantarov P.L., Tseitlin L.A. *Raschet induktivnosti: spravochnaya kniga* [Calculation of inductance: reference book]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1986, p. 192.
9. 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. (In Russian).
10. Lykin A.V. *Elektricheskie sistemy i seti* [Electrical system and network]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2017. 363 p.
11. 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.
12. Gorelov V.P., ed. *Put' ot magistranta do professora* [The way from master of science up to professor]. Novosibirsk, Siberian State University of Water Transport Publ., 2015. 571 p.
13. Kravchenko V.M. Samoe tsennoe kachestvo v elektroenergetike – nezametnost' [The most important character of electrical energy is obscurity]. *Edinaya set'*, 2008, no. 16 (53), April, p. 11.
14. = *Prikaz Minenergo Rossii ot 30 dekabrya 2008 goda N 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. 86 p.
15. Zhelezko Yu.S. *Poteri elektroenergii. Reaktivnaya moshchnost'. Kachestvo elektroenergii: rukovodstvo dlya prakticheskikh raschetov* [Electric loss. Reactive power. Power quality: book for practice]. Moscow, NC ENAS Publ., 2004, p. 24.