

# Напряжения на грозозащитном тросе воздушной линии электропередачи как фактор риска. Часть 1

**А.Ю. Токарский**, рук. группы<sup>1</sup>, ведущий эксперт<sup>2</sup>, доцент, д-р техн. наук

**Н.Б. Рубцова**, зав. отделом, профессор, д-р. биолог. наук<sup>1</sup>

**В.Н. Рябченко**, главный технолог АСУ, профессор, д-р техн. наук<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФГБНУ «Научно-исследовательский институт медицины труда», Москва

<sup>2</sup> ОАО «Научно-технический центр Федеральной сетевой компании Единой энергетической системы», Москва

e-mail: tokar48@mail.ru

## Ключевые слова:

трехфазная воздушная линия электропередачи, грозозащитные тросы, симметричный режим, однофазное короткое замыкание, электрическое и магнитное поле, распределение наведенного напряжения.

Для обеспечения безопасности персонала, проводящего работы под напряжением на воздушной линии (ВЛ) электропередачи, и сохранения целостности изоляции грозозащитных тросов (ГТ), на примере трехфазной ВЛ 750 кВ представлен алгоритм расчета напряжения и электродвижущих сил (ЭДС), наведенных в ГТ этой линии электрическим и магнитным полями (ЭП и МП), создаваемых напряжениями и токами фаз ВЛ. Даны алгоритмы расчета распределения напряжений относительно земли вдоль заземленных на одном конце участков ГТ. Показано, что напряжение, наведенное на ГТ ЭП ВЛ 750 кВ, намного меньше напряжения, наведенного МП этой линии. Для режимов однофазных коротких замыканий дан алгоритм выбора длины заземленного на одном конце участка ГТ по условию соблюдения предельно допустимого уровня напряжения на искровом промежутке, шунтирующем изолирующую подвеску ГТ.

## 1. Введение

На грозозащитном тросе (ГТ) работающей воздушной линии (ВЛ) электропередачи наводятся напряжения, создаваемые электрическим полем (ЭП) находящихся под напряжением фаз ВЛ, и электродвижущие силы (ЭДС), индуцируемые магнитным полем (МП) токов, протекающих в этих фазах. Если ГТ не заземлен, то величина наведенного на нем напряжения может достигать нескольких десятков киловольт, что может привести к пробое его изоляции, а если он заземлен в двух или более местах, то под действием наведенных ЭДС в нем протекают токи, приводящие к дополнительным потерям активной мощности. Поэтому ГТ, выполняющие только свои защитные функции, разбиваются на участки, каждый из которых заземляется в одной точке. Величины наведенных на ГТ напряжений и ЭДС необходимо знать для обеспечения как безопасности персонала, проводящего на ВЛ работы под напря-

жением, так и для целостности подвесной изоляции этих тросов.

## 2. Параметры троса и схемы расчета

Методики расчета напряжений и ЭДС, наведенных в ГТ, рассмотрим на примере ВЛ 750 кВ с горизонтальным расположением фаз и содержащей два грозозащитных троса. Начальный проектировочный план ВЛ на первом шаге транспозиции фаз с предлагаемой схемой транспозиции тросов показан на рис. 1.

В начале линии на участке протяженностью 4 км ГТ Т1 и Т2 заземлены на каждой опоре, а далее, после транспозиции, разбиваются на участки по 10,43 км с заземлением на правом конце каждого из них. На рис. 2 дана схема расположения фаз и двух ГТ на промежуточной опоре ВЛ 750 кВ для начала первого участка тросов протяженностью 10,43 км.

Собственное удельное индуктивное сопротивление провода или грозозащитного троса  $i$  ВЛ с учетом

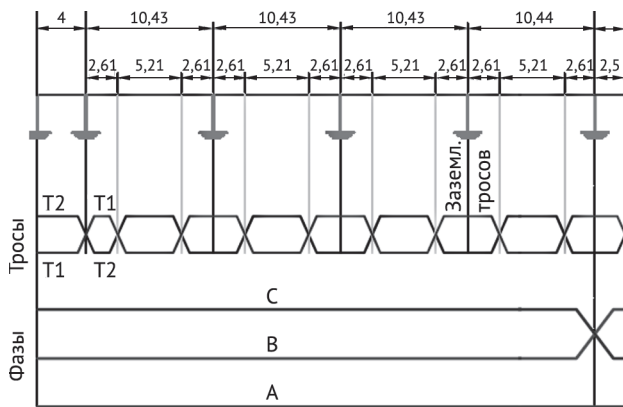


Рис. 1. План расположения фаз и ГТ ВЛ 750 кВ на первом шаге транспозиции фаз

удельного сопротивления земли определяется по выражению (1), полученному на основе интеграла Карсона, где:  $\omega = 2\pi f$  — угловая частота;  $f = 50$  Гц — частота сети;  $\delta_3 = \sqrt{2\rho_3/(\omega\mu_0)}$  — глубина проникновения, т.е. глубина, проникнув на которую, электромагнитная волна затухает в  $e = 2,72$  раза;  $\rho_3$  — удельное сопротивление земли;  $r_{инп}$  — радиус провода (троса)  $i$ ;  $h_i$  — высота расположения провода (троса)  $i$  над землей [1–4]:

$$Z_{ii0} = j\omega L_i = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \times \left( \ln \frac{\sqrt{2}\delta_3}{r_{инп}} - j\frac{\pi}{4} + \frac{4}{3} \frac{h_i}{\delta_3} (1+j) - 0,0772 \right), \text{ [Ом/м]}. \quad (1)$$

Электрическая схема замещения заземленного на правом конце провода или троса  $i$  длиной  $l_i$  показана на рис. 3, где:  $R_{3Y}$  — сопротивление заземляющего устройства (ЗУ);  $R_\Lambda$  — активное сопротивление провода или троса  $l$ ;  $C_\Lambda$  — емкость провода или троса  $i$  относительно земли.

Фазы ВЛ 750 кВ выполнены проводом 5×АСк2у-300/39. Диаметр провода 21,5 мм. Радиус расщепления фаз 40 см. Эквивалентная высота расположения центров фаз 17,3 м. Тросы Т1 и Т2 выполнены стальным грозозащитным тросом ГТК20–0/90–12.1/104 диаметром 12,1 мм (радиусом 6,05 мм), имеющим удельное активное сопротивление  $R_{0ГТК} = 0,9993$  Ом/км. Эквивалентная высота расположения осей ГТ 31 м.

Для  $\rho_3 = 100$  Ом·м из (1) получим собственное удельное индуктивное сопротивление тросов Т1 и Т2:  $Z_{ii0} = 0,0457 + j0,7542$  Ом/км, что для длины троса  $l_{Т1} = 10,43$  км составит  $Z_{ii} = Z_{ii0} \cdot l_{Т1} = 0,4766 +$

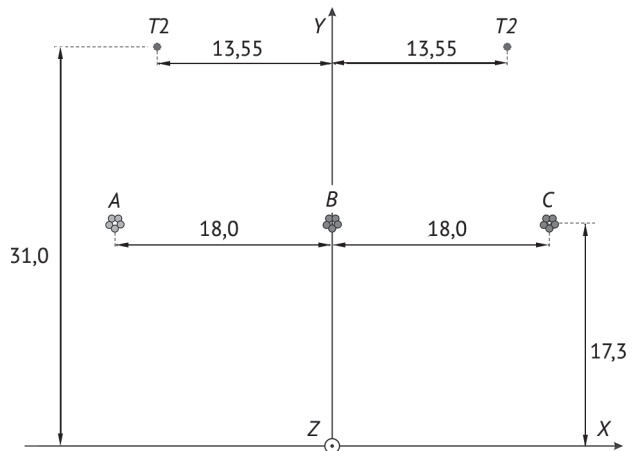


Рис. 2. Схема расположения фаз и двух ГТ ВЛ 750 кВ для начала первого участка тросов Т1 и Т2 протяженностью 10,43 км

+  $j7,866$  Ом. При том же  $\rho_3$  сопротивление ЗУ опор  $R_{3Y} = 10$  Ом [5]. Активное сопротивление ГТ  $R_\Lambda = 10,423$  Ом.

Емкостные коэффициенты троса Т1 ВЛ 750 кВ получены по программе «ЭМП ВЛ» [6] и имеют значения, Ф/км:

$$\beta_{AT1} = -0,3367E-09; \beta_{BT1} = -0,8946E-09; \\ \beta_{CT1} = -0,1375E-08; \\ \beta_{T2T1} = -0,4146E-09; \beta_{T1T1} = 0,6350E-08.$$

Удельная емкость троса Т1 относительно земли составит [7]:

$$C_{T1T1} = \beta_{T1T1} + \beta_{AT1} + \beta_{BT1} + \beta_{CT1} + \beta_{T2T1} = \\ = 0,3229 \times 10^{-8} \text{ Ф/км},$$

а полная емкость —  $C_\Lambda = C_{T1T1} \cdot l_{T1} = 3,368 \cdot 10^{-8}$  Ф, что даст величину емкостного сопротивления  $X_{C_\Lambda} = 1/(\omega C_\Lambda) = 9,451 \cdot 10^4$  Ом, т.е. 94,5 кОм. Сопротивление цепи  $R_\Lambda, Z_{ii}$  и  $R_{3Y}$  составляет  $Z = R_\Lambda + Z_{ii} + R_{3Y} = 20,90 + j7,866$  Ом, а модуль сопротивления этой цепи имеет значение  $|Z| = 22,331$  Ом.

Значение сопротивления  $|Z|$  составляет 0,024% от сопротивления  $X_{C_\Lambda}$ , а это означает, что модуль тока

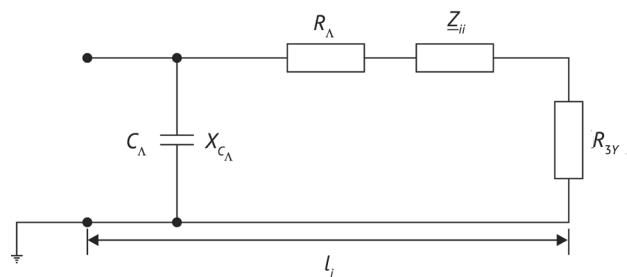


Рис. 3. Схема замещения заземленного на правом конце провода или троса  $i$  длиной  $l_i$

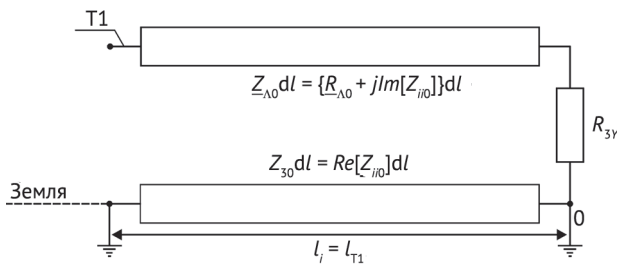


Рис. 4. Расчетная схема для определения токов и напряжений в тресе Т1

в цепи  $X_{C_A}$  составит 0,024% от модуля тока в цепи  $|Z|$ , и током в цепи  $X_{C_A}$ , а значит, и самой цепью  $X_{C_A}$ , можно пренебречь. Тогда мы получим расчетную схему для определения токов и напряжений в тресе Т1, вид которой в дифференциальной форме обозначения распределенных сопротивлений показан на рис. 4.

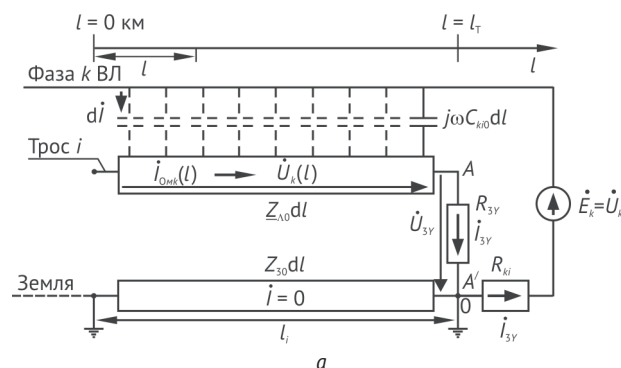
На рис. 4 приняты следующие обозначения:  $Z_{\Delta 0}$  — удельное комплексное сопротивление провода треса Т1,  $R_{\Delta 0}$  — удельное активное сопротивление треса Т1;  $\text{Im}[Z_{ii0}]$  — удельное индуктивное сопротивление треса Т1;  $R_{3Y}$  — сопротивление заземляющего устройства;  $Z_{30} = \text{Re}[Z_{ii0}]$  — погонное сопротивление обратному току в земле:

$$Z_{\Delta 0} = 0,9993 + j0,7542 \text{ Ом/км}, Z_{30} = 0,0457 \text{ Ом/км}, R_{3Y} = 10 \text{ Ом}.$$

Поскольку  $\text{Im}[Z_{ii0}]$  отвечает за индуктивную часть собственного индуктивного сопротивления  $Z_{ii0}$ , то она принадлежит проводу треса и располагается до сопротивления ЗУ  $R_{3Y}$ . Реальная часть  $\text{Re}[Z_{ii0}]$  сопротивления  $Z_{ii0}$  отвечает за потери в земле и расположена после  $R_{3Y}$ .

### 3. Напряжение на ГТ, создаваемое ЭП фаз ВЛ

Рассмотрим вариант, когда ГТ ВЛ 750 кВ на участке  $l_T = 10,43$  км установлены без транспозиции и заземлены на правом конце, как показано на рис. 5а.



Источник питания ВЛ также расположен справа. На рис. 5а линия представлена одной фазой  $k$ , а ГТ — одним тресом  $i$ ;  $C_{ki0}$  — частичная емкость между тресом  $i$  и фазой  $k$ ;  $\dot{E}_k = \dot{U}_k$  — ЭДС источника, равная фазному напряжению (напряжению относительно земли) фазы  $k$ ;  $R_{ki}$  — сопротивление между ЗУ последней опоры ГТ  $i$  и ЗУ источника  $\dot{E}_k = \dot{U}_k$  фазы  $k$ , включая величину сопротивления ЗУ источника.

Величину тока в тресе  $i$  от фазы  $k$  можно определить по закону Ома (см. рис. 5а) [8]:

$$\dot{I}_{\text{Омк}}(l) = \frac{\dot{E}_k}{Z_{\Delta 0} l - j1/(\omega C_{ki0} l) + R_{3Y} + R_{ki}}. \quad (2)$$

В (2) наибольшее значение  $Z_{\Delta 0} l$  будет при  $l = l_T$  и составит  $Z_{\Delta} = Z_{\Delta 0} l_T = 10,4 + j7,9$  Ом или  $|Z_{\Delta}| = 13,1$  Ом. Наибольшее значение  $R_{ki}$  даже при удалении ЗУ источника на 1000 км при  $R_{3Y}$  источника 10 Ом составит:  $R_{ki} = \text{Re}[Z_{ii0}] \cdot 1000 + 10 = 55,7$  Ом. Минимальное значение емкостного сопротивления  $1/(\omega C_{ki0} l)$  будет между фазой  $C$  и тресом Т1 при  $C_{ki0} = C_{CT10} = -\beta_{CT10} = 0,1375 \cdot 10^{-8}$  Ф/км для  $l = l_T$  и составит 221,95 кОм. Модуль суммы сопротивлений  $Z_{\Delta 0} l_T$ ,  $R_{ki}$  и  $R_{3Y} = 10$  Ом даст значение 88,02 Ом, что меньше значения емкостного сопротивления  $1/(\omega C_{ki0} l_T)$  более чем в 2500 раз. Тогда, пренебрегая очень малыми значениями сопротивлений, из уравнения (2) получим выражение и схему (см. рис. 5б) для определения тока и напряжения, наводимых в тресе  $i$  ЭП фазы  $k$ :

$$\dot{I}_k(l) = j\omega C_{ki0} \dot{E}_k l = Y_{Ck0} \dot{E}_k l, \quad (3)$$

где:  $Y_{Ck0} = j\omega C_{ki0}$  — удельная емкостная проводимость между фазой  $k$  и тресом  $i$ ;  $d\dot{I} = Y_{Ck0} \dot{E}_k dl$  — распределенный источник тока между фазой  $k$  и тресом  $i$ .

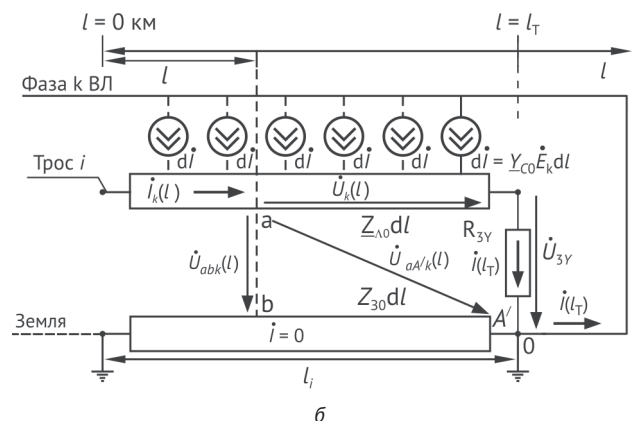


Рис. 5. Схемы с распределенными емкостью (а) и источником тока (б) для расчета токов и напряжений, наводимых на ГТ  $i$  ЭП фазы  $k$

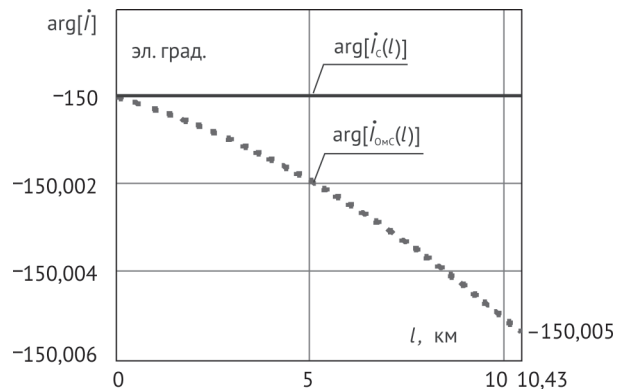
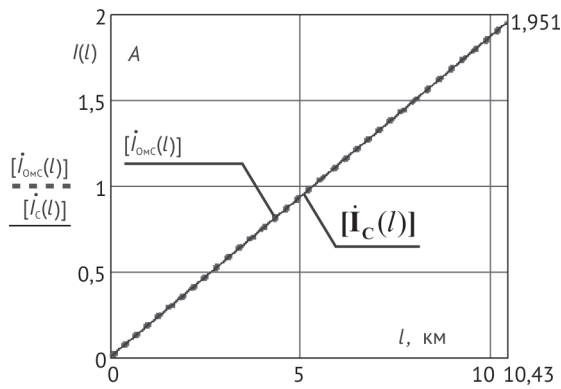


Рис. 6. Изменение модуля (а) и аргумента (б) токов  $\dot{I}_{\text{омс}}(l)$  и  $\dot{I}_c(l)$

На рис. 6 показано изменение модулей и аргументов тока  $\dot{I}_{\text{омс}}(l)$ , полученного по выражению (2), и тока  $\dot{I}_c(l)$ , полученного по выражению (3), при воздействии на трос Т1 ЭП фазы С, для значений  $\dot{E}_c = 433013 \angle 120^\circ$  В (модуль  $\angle$  аргумент).

Как следует из рис. 6, модули токов  $\dot{I}_{\text{омс}}(l)$  и  $\dot{I}_c(l)$  полностью совпадают для всего участка изменения  $l$  от 0 до  $l_T$ , а аргумент тока  $\dot{I}_c(l)$  имеет максимальное расхождение на 0,0033% от аргумента тока  $\dot{I}_{\text{омс}}(l)$  при  $l = l_T$ .

Для распределения напряжения вдоль троса Т1 согласно рис. 5б можно записать:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{abk}(l) &= \dot{U}_{aA'k}(l) = \dot{U}_k(l) + \dot{U}_{3Y}, \\ \dot{U}_k(l) &= \int \dot{I}_k(l) \underline{Z}_{\Lambda 0} dl = j\omega C_{ki0} \dot{E}_k \underline{Z}_{\Lambda 0} \int dl = \\ &= \frac{1}{2} j\omega C_{ki0} \dot{E}_k \underline{Z}_{\Lambda 0} l^2 + C \end{aligned}$$

где  $C$  — постоянная интегрирования. Тогда:

$$\dot{U}_{abk}(l) = \dot{U}_{aA'k}(l) = \frac{1}{2} j\omega C_{ki0} \dot{E}_k \underline{Z}_{\Lambda 0} l^2 + \dot{U}_{3Y} + C.$$

При  $l = l_T$  напряжение  $\dot{U}_{aA'k}(l_T) = \dot{U}_{3Y}$  и

$$C = -\frac{1}{2} j\omega C_{ki0} \dot{E}_k \underline{Z}_{\Lambda 0} l_T^2.$$

Поскольку  $\dot{U}_{3Y} = \dot{I}_k(l_T) R_{3Y}$ , выражение для напряжения  $\dot{U}_{abk}(l)$  примет вид:

$$\dot{U}_{abk}(l) = \dot{U}_{aA'k}(l) = \dot{I}_k(l_T) R_{3Y} + \frac{1}{2} j\omega C_{ki0} \dot{E}_k \underline{Z}_{\Lambda 0} (l^2 - l_T^2). \quad (4)$$

По методу наложения (суперпозиции) результирующий ток в тросе Т1, наводимый ЭП всех фаз А, В и С, найдем, суммируя токи от каждой фазы:

$$\dot{I}_{T1}(l) = \dot{I}_A(l) + \dot{I}_B(l) + \dot{I}_C(l).$$

Тогда с учетом выражения (3) получим:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{T1}(l) &= j\omega(C_{AT10} \dot{E}_A + C_{BT10} \dot{E}_B + C_{CT10} \dot{E}_C)l = \\ &= j\omega l \sum_{k=A}^C C_{kT10} \dot{E}_k. \end{aligned} \quad (5)$$

Результирующее напряжение  $\dot{U}_{abT1}(l)$  найдем как сумму напряжений от фаз А, В и С. Тогда из уравнения (4) с учетом (5) получим:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{abT1}(l) &= \dot{U}_{aA'T1}(l) = \\ &= j\omega \sum_{k=A}^C C_{kT10} \dot{E}_k \left[ R_{3Y} l_T + \frac{1}{2} \underline{Z}_{\Lambda 0} (l^2 - l_T^2) \right]. \end{aligned} \quad (6)$$

Для фаз А, В и С ВЛ 750 кВ ЭДС  $\dot{E}_k$  и емкости  $C_{kT10}$  имеют следующие значения:  $\dot{E}_A = 750000/\sqrt{3} = 433013$  В,  $C_{AT10} = -\beta_{AT1} = 0,3367 \cdot 10^{-9}$  Ф/км,  $\dot{E}_B = 433013 \angle -120^\circ$  В,  $C_{BT10} = -\beta_{BT1} = 0,8946 \cdot 10^{-9}$  Ф/км и  $\dot{E}_C = 433013 \angle 120^\circ$  В,  $C_{CT10} = -\beta_{CT1} = 0,1375 \cdot 10^{-8}$  Ф/км.

На рис. 7 показано распределение вдоль троса Т1 без транспозиции модулей и аргументов напряжений  $\dot{U}_{abA}(l)$ ,  $\dot{U}_{abB}(l)$ ,  $\dot{U}_{abC}(l)$ , создаваемых отдельно каждой фазой линии, а также результирующего напряжения  $\dot{U}_{abT1}(l)$ . Для длины заземленного на одном конце участка ГТ  $l_T = 10,43$  км значения напряжения  $\dot{U}_{abT1}(l)$  не велики и составляют 7,9 В на незаземленном его конце и 12,8 В на ЗУ. Однако при увеличении  $l_T$ , допустим, до 30 км картина изменения  $\dot{U}_{abT1}(l)$  вдоль троса Т1 изменится (рис. 8).

Транспозиция тросов Т1 и Т2 приводит к снижению наведенных токов и напряжений.

#### 4. Напряжения на ГТ, создаваемые МП токов фаз ВЛ

В вертикальном контуре ГТ–земля троса  $i$  МП тока фазы  $k$  (рис. 9) наводится удельная ЭДС  $\dot{E}_{kik0}$ , выражение для которой получено на основе интеграла Кар-

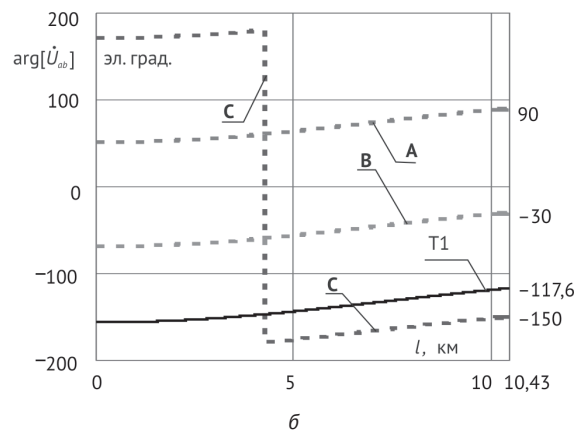
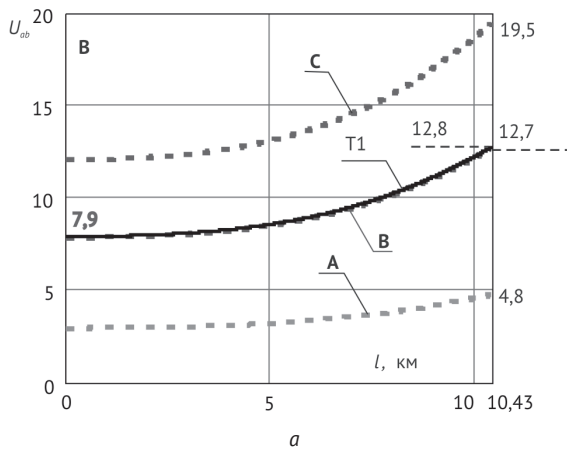


Рис. 7. Изменение модуля (а) и аргумента (б) напряжений  $\dot{U}_{обА}(l)$ ,  $\dot{U}_{обВ}(l)$ ,  $\dot{U}_{обС}(l)$  и  $\dot{U}_{обТ1}(l)$  вдоль троса Т1 без транспозиции, при  $l_T = 10,43$  км

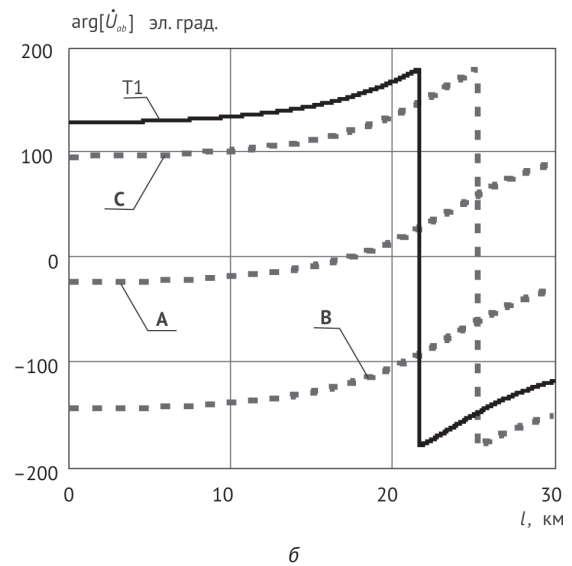
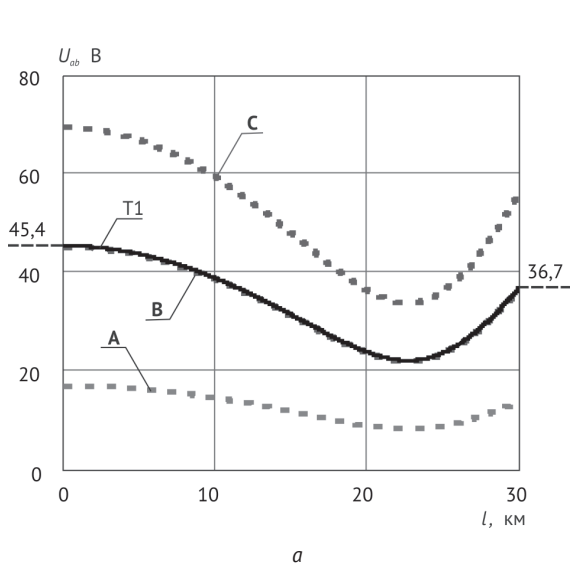


Рис. 8. Изменение модуля (а) и аргумента (б) напряжений  $\dot{U}_{обА}(l)$ ,  $\dot{U}_{обВ}(l)$ ,  $\dot{U}_{обС}(l)$  и  $\dot{U}_{обТ1}(l)$  вдоль троса Т1 без транспозиции, при  $l_T = 30$  км

сона, где  $h_k$  и  $h_i$  — высота расположения осей фазы  $k$  и троса  $i$  над землей;  $a_{ik}$  — расстояние по оси  $x$  между тросом  $i$  и фазой  $k$ ;  $\dot{I}_k$  — ток в фазе  $k$ , ток в тросе  $i$   $\dot{I}_M = 0$ :

$$\dot{E}_{Кик0} = -\frac{j\omega\mu_0 \dot{I}_k}{10^{-3}2\pi} \left[ \ln \frac{\sqrt{2}\delta_3}{\sqrt{a_{ik}^2 + (h_k - h_i)^2}} - j\frac{\pi}{4} + \frac{2h_k + h_i}{3\delta_3} (1 + j) - 0,0772 \right], \text{ В/км.}$$

Проинтегрировав ЭДС  $d\dot{E}_{Кик0} = \dot{E}_{Кик0} dl$  по  $l$  от  $l$  до  $l_T$ , получим выражение для ЭДС  $\dot{E}_{Кик}(l)$ :

$$\dot{E}_{Кик}(l) = \dot{E}_{Кик0} \int_l^{l_T} dl = \dot{E}_{Кик0} (l_T - l).$$

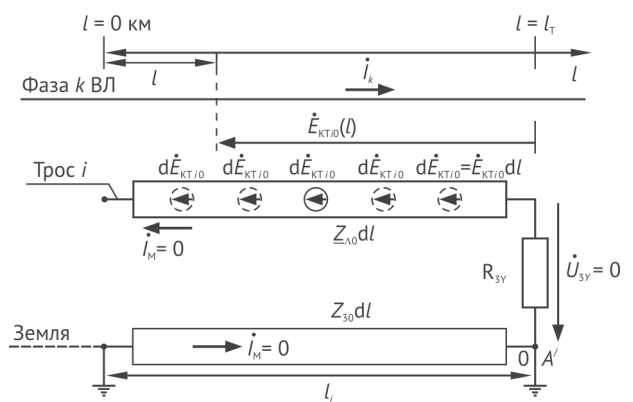


Рис. 9. К определению ЭДС  $\dot{E}_{КТ/0}(l)$  в тросе  $i$

Подставляя выражение для  $\dot{E}_{Kik0}$ , можно записать:

$$\dot{E}_{Kik}(l) = -\frac{j\omega\mu_0 \dot{I}_k}{10^{-3}2\pi} \left[ \ln \frac{\sqrt{2}\delta_3}{\sqrt{a_{ik}^2 + (h_k - h_i)^2}} - j\frac{\pi}{4} + \frac{2}{3} \frac{h_k + h_i}{\delta_3} (1+j) - 0,0772 \right] (l_T - l), \text{ В/км.} \quad (7)$$

Суммируя по методу наложения ЭДС от каждой фазы, получим для тросов Т1 и Т2:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{KT1}(l) &= -\frac{j\omega\mu_0 (l_T - l)}{10^{-3}2\pi} \sum_{k=A}^C \dot{I}_k \left[ \ln \frac{\sqrt{2}\delta_3}{\sqrt{a_{T1k}^2 + (h_k - h_{T1})^2}} - j\frac{\pi}{4} + \frac{2}{3} \frac{h_k + h_{T1}}{\delta_3} (1+j) - 0,0772 \right], \\ \dot{E}_{KT2}(l) &= -\frac{j\omega\mu_0 (l_T - l)}{10^{-3}2\pi} \sum_{k=A}^C \dot{I}_k \left[ \ln \frac{\sqrt{2}\delta_3}{\sqrt{a_{T2k}^2 + (h_k - h_{T2})^2}} - j\frac{\pi}{4} + \frac{2}{3} \frac{h_k + h_{T2}}{\delta_3} (1+j) - 0,0772 \right]. \end{aligned} \quad (8)$$

В горизонтальной плоскости расположения тросов Т1 и Т2 ( $y = 31$  м) в контуре Т1-Т2 МП токов фаз наводятся вихревые ЭДС (рис. 10а)  $\dot{E}_{BT1}(l)$  и  $\dot{E}_{BT2}(l)$ :

$$\dot{E}_{BT1}(l) + \dot{E}_{BT2}(l) = -\frac{d\dot{\Phi}_Y(l)}{dt} = -j\omega\dot{\Phi}_Y(l), \quad (9)$$

где  $\dot{\Phi}_Y(l)$  — составляющая по оси  $y$  магнитного потока сквозь контур Т1-Т2.

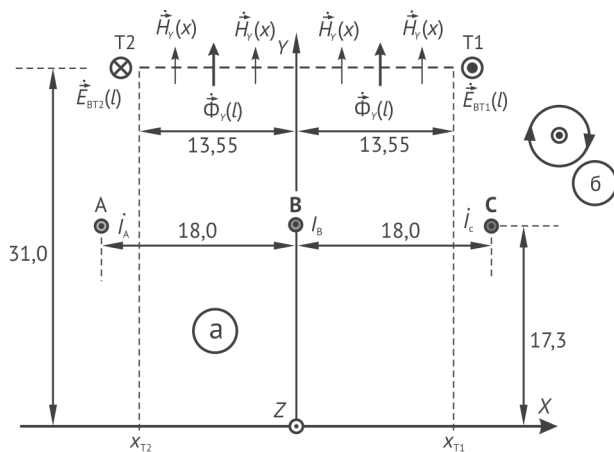


Рис. 10. К определению ЭДС  $\dot{E}_{BT1}(l)$  и  $\dot{E}_{BT2}(l)$  в контуре Т1-Т2

$$\dot{\Phi}_Y(l) = \mu_0 \int_{x_{T2}}^{x_{T1}} \dot{H}_Y(x) \int_l^{l_T} dz dx = \mu_0 (l_T - l) \int_{x_{T2}}^{x_{T1}} \dot{H}_Y(x) dx, \quad (10)$$

где  $\dot{H}_Y(x)$  — результирующая составляющая, а  $\dot{H}_{YA}(x)$ ,  $\dot{H}_{YB}(x)$  и  $\dot{H}_{YC}(x)$  — составляющие по оси  $y$  напряженности МП, создаваемого токами фаз А, В и С ВЛ 750 кВ, которые определяются по выражениям (рис. 11):

$$\dot{H}_Y(x) = \dot{H}_{YA}(x) + \dot{H}_{YB}(x) + \dot{H}_{YC}(x); \quad (11)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{H}_{YA}(x) &= \frac{\dot{I}_A}{2\pi} \frac{x-a}{(x-a)^2 + (h_\Phi - y)^2}; \\ \dot{H}_{YB}(x) &= \frac{\dot{I}_B}{2\pi} \frac{x-b}{(x-b)^2 + (h_\Phi - y)^2}; \\ \dot{H}_{YC}(x) &= \frac{\dot{I}_C}{2\pi} \frac{x-c}{(x-c)^2 + (h_\Phi - y)^2}; \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

где:  $a, b$  и  $c$  — координаты по оси  $x$  осей фаз А, В и С,  $h_\Phi$  — высота расположения над землей осей фаз ВЛ,

$$r_a = \sqrt{(x-a)^2 + (h_\Phi - y)^2}.$$

Поскольку тросы Т1 и Т2 параллельны, а также заземлены в одной точке на правых концах,  $\dot{E}_{BT1}(l) = \dot{E}_{BT2}(l)$ . Тогда из (9) с учетом (10) получим:

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_{BT1}(l) = \dot{E}_{BT2}(l) &= -\frac{1}{2} j\omega\dot{\Phi}_Y(l) = \\ &= -\frac{1}{2} j\omega\mu_0 \int_{x_{T2}}^{x_{T1}} \dot{H}_Y(x) dx (l_T - l) = \dot{E}_{BT0}(l_T - l), \\ \dot{E}_{BT0} &= -\frac{1}{2} j\omega\mu_0 \int_{x_{T2}}^{x_{T1}} \dot{H}_Y(x) dx, \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

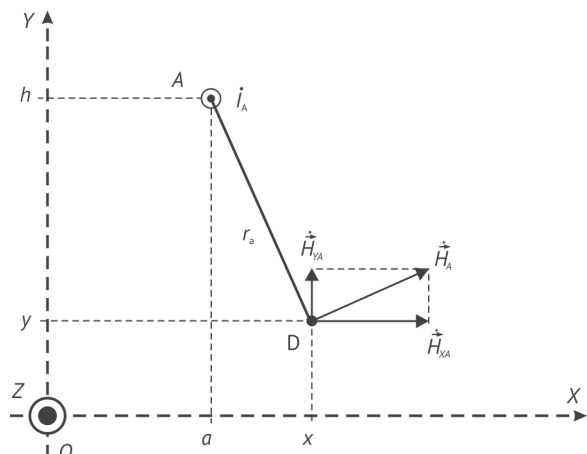


Рис. 11. К определению составляющей напряженности  $\dot{H}_{YA}(x)$  МП, создаваемого током фазы А

где  $\dot{E}_{\text{ВТО}}$  — удельная вихревая ЭДС, наведенная в тросах потоком  $\dot{\Phi}_Y$ .

Направления  $\dot{E}_{\text{ВТ1}}(l)$  и  $\dot{E}_{\text{ВТ2}}(l)$  определим по правилу левого винта (рис. 10б).

#### 4.1. ГТ без транспозиции, симметричный режим работы ВЛ

Рассмотрим вариант, когда тросы Т1 и Т2 на участке  $l_T = 10,43$  км установлены без транспозиции (рис. 12). ИПТ $i$  — искровой промежуток троса  $i$ , шунтирующий изолированное крепление троса. Распределение напряжений вдоль тросов Т1 и Т2 найдем по выражениям:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\text{abT1}}^{\text{MS}}(l) &= \dot{E}_{\text{КТ1}}(l) - \dot{E}_{\text{ВТ1}}(l) \text{ и} \\ \dot{U}_{\text{abT2}}^{\text{MS}}(l) &= \dot{E}_{\text{КТ2}}(l) + \dot{E}_{\text{ВТ2}}(l). \end{aligned} \quad (14)$$

Наибольшие значения токов в фазах ВЛ 750 кВ:  $\dot{I}_A = 705$  А,  $\dot{I}_B = 705 \angle -120^\circ$  А и  $\dot{I}_C = 705 \angle 120^\circ$  А.

Эквивалентная высота подвеса:  $h_A = h_B = h_C = h_\Phi = 17,3$  м,  $h_{\text{T1}} = h_{\text{T2}} = 31,0$  м.

Расстояния между фазами и тросами:  $a_{\text{AT1}} = 31,55$  м,  $a_{\text{BT1}} = 13,55$  м,  $a_{\text{CT1}} = 4,45$  м,  $a_{\text{AT2}} = 4,45$  м,  $a_{\text{BT2}} = 13,55$  м,  $a_{\text{CT2}} = 31,55$  м.

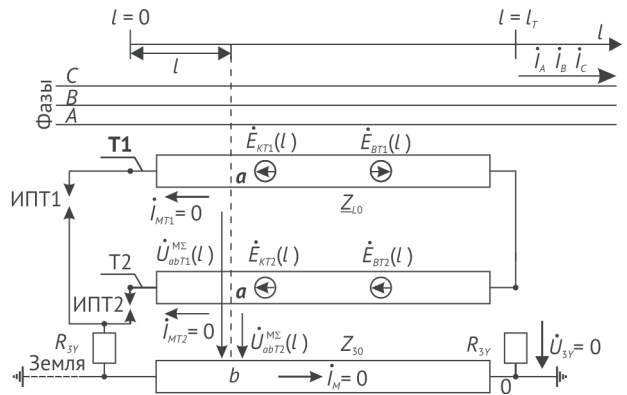


Рис. 12. Тросы Т1 и Т2 на участке  $l_T = 10,43$  км установлены без транспозиции

При определении  $\delta_3 = \sqrt{2\rho_3 / (\omega\mu_0)}$  принимается  $\rho_3 = 100$  Ом·м.

На рис. 13 дано распределение модулей и аргументов:  $a$  — ЭДС  $\dot{E}_{\text{КТ1}}(l)$  и  $\dot{E}_{\text{КТ2}}(l)$ ,  $b$  — ЭДС  $\dot{E}_{\text{ВТ1}}(l)$  и  $\dot{E}_{\text{ВТ2}}(l)$ ,  $v$  — напряжений  $\dot{U}_{\text{abT1}}^{\text{MS}}(l)$  и  $\dot{U}_{\text{abT2}}^{\text{MS}}(l)$  вдоль тросов Т1 и Т2 без транспозиции на участке  $l_T = 10,43$  км при симметричной нагрузке ВЛ 750 кВ.

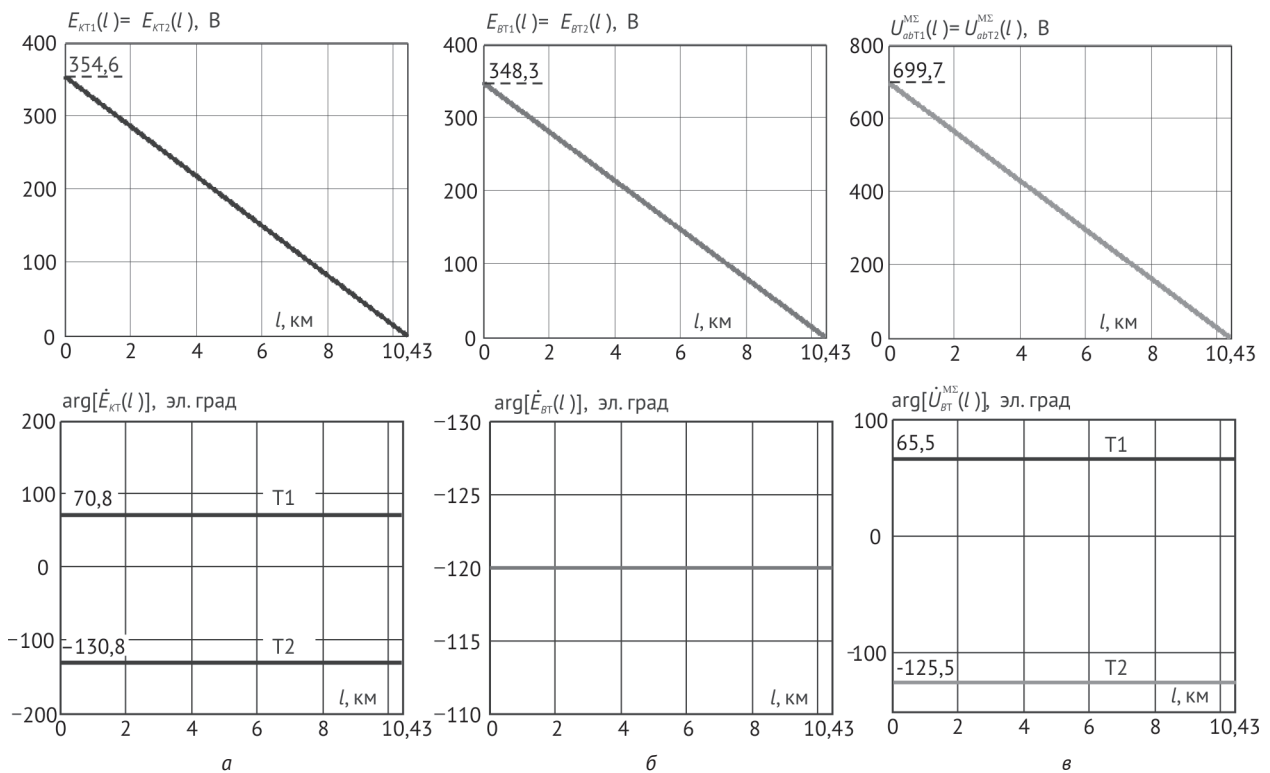


Рис. 13. Распределение модулей и аргументов:  $a$  — ЭДС  $\dot{E}_{\text{КТ1}}(l) = \dot{E}_{\text{КТ2}}(l)$ ,  $b$  — ЭДС  $\dot{E}_{\text{ВТ1}}(l) = \dot{E}_{\text{ВТ2}}(l)$ ,  $v$  — напряжений  $\dot{U}_{\text{abT1}}^{\text{MS}}(l)$  и  $\dot{U}_{\text{abT2}}^{\text{MS}}(l)$  вдоль тросов Т1 и Т2 без транспозиции на участке  $l_T = 10,43$  км при симметричной нагрузке ВЛ 750 кВ



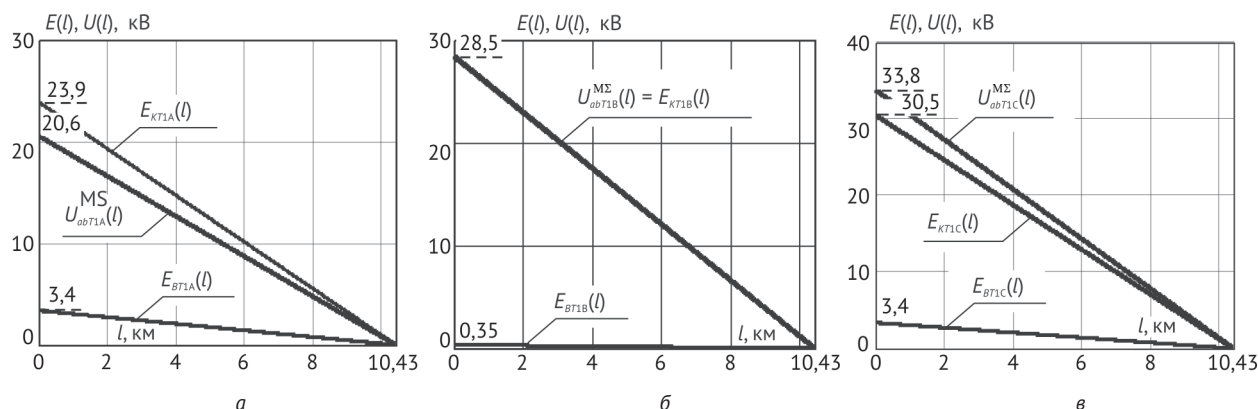


Рис. 14. Распределение модулей ЭДС  $\dot{E}_{KT1k}(l)$ ,  $\dot{E}_{BT1k}(l)$  и напряжения  $\dot{U}_{abT1k}^{MS}(l)$  при однофазном КЗ фаз А (а), В (б) и С (в)

ЭДС  $\dot{E}_{KT1}(l) = \dot{E}_{KT2}(l)$  в тросах Т1 и Т2 на их разомкнутых концах имеют значения:  $\dot{E}_{KT1}(0) = 354,6 \angle 70,8^\circ$  В и  $\dot{E}_{KT1}(0) = 354,6 \angle -130,8^\circ$  В.

ЭДС  $\dot{E}_{BT1}(l) = \dot{E}_{BT2}(l)$ , наведенные в горизонтальной плоскости тросов Т1 и Т2, одинаковы:  $\dot{E}_{KT1}(0) = \dot{E}_{KT2}(0) = 348,3 \angle -120,0^\circ$  В.

Результирующее напряжения на разомкнутых концах тросов Т1 и Т2 составит:

$$\dot{U}_{abT1}^{MS}(0) = 699,7 \angle 65,5^\circ \text{ В и } \dot{U}_{abT2}^{MS}(0) = 699,7 \angle -125,5^\circ \text{ В.}$$

#### 4.2. ГТ без транспозиции, режим однофазного короткого замыкания

Рассмотрим режим однофазного короткого замыкания (КЗ) каждой из фаз ВЛ 750 кВ. В области расположения исследуемого участка тросов Т1 и Т2 протяженностью 10,43 км в установившемся режиме наибольшее значение модуля тока однофазного КЗ фазы  $k$  составляет 11500 А, в неповрежденных фазах модули токов равны 705 А.

Распределение модулей ЭДС  $\dot{E}_{KT1k}(l)$ ,  $\dot{E}_{BT1k}(l)$  и напряжения  $\dot{U}_{abT1k}^{MS}(l)$  при однофазном КЗ фаз А, В и С показано на рис. 14.

При КЗ фазы С на разомкнутом конце троса Т1 ( $l = 0$ )  $\dot{E}_{KT1C}(0) = 30,5 \angle 20^\circ$  кВ, а значение ЭДС  $\dot{E}_{BT1C}(0) = 3,4 \angle -147^\circ$  кВ. Таким образом,  $\dot{E}_{KT1C}(0)$  и  $\dot{E}_{BT1C}(0)$  направлены практически встречно, и, поскольку  $\dot{U}_{abT1C}^{MS}(0) = \dot{E}_{KT1C}(0) - \dot{E}_{BT1C}(0)$ , модуль  $\dot{U}_{abT1C}^{MS}(0)$  становится больше модуля  $\dot{E}_{KT1C}(0)$ :  $\dot{U}_{abT1C}^{MS}(0) = 33,8$  кВ.

При КЗ фазы В  $\dot{E}_{KT1B}(0) = 28,5 \angle 139^\circ$  кВ,  $\dot{E}_{BT1B}(0) = 0,35 \angle -120^\circ$  кВ и  $\dot{U}_{abT1B}^{MS}(0)$  практически полностью совпадает с  $\dot{E}_{KT1B}(0)$ .

При КЗ фазы А  $\dot{E}_{KT1A}(0) = 23,9 \angle -102^\circ$  кВ,  $\dot{E}_{BT1A}(0) = 3,4 \angle -93^\circ$  кВ и модуль  $\dot{U}_{abT1A}^{MS}(0) = \dot{E}_{KT1A}(0) - \dot{E}_{BT1A}(0)$  становится меньше модуля  $\dot{E}_{KT1A}(0)$ :  $|\dot{U}_{abT1A}^{MS}(0)| = 20,6$  кВ.

Для троса Т2 кривые ЭДС  $\dot{E}_{KT1k}(l)$ ,  $\dot{E}_{BT1k}(l)$  и напряжения  $\dot{U}_{abT1k}^{MS}(l)$  фаз А и С меняются местами.

#### 4.3. ГТ с транспозицией, симметричный режим работы ВЛ

На рис. 15 представлена схема определения напряжения  $\dot{U}_{abT1}^{MS}(l)$  на тросе Т1, установленного с транспозицией. Цикл транспозиции троса Т1 содержит три шага: первый и третий шаги имеют протяженность  $l_1 = l_3 = 2,61$  км, а второй  $l_2 = 5,21$  км. На втором шаге транспозиции тросы Т1 и Т2 меняются местами, в результате в тросе Т1 МП токов фаз наводятся совпадающие по направлению ЭДС  $\dot{E}_{KT2}(l)$  и  $\dot{E}_{BT2}(l)$ .

Из уравнения (8) найдем удельные ЭДС  $\dot{E}_{KT10}$  и  $\dot{E}_{KT20}$ , наведенные токами фаз в вертикальных контурах тросов Т1 и Т2:

$$\dot{E}_{KT10} = -\frac{j\omega\mu_0}{10^{-3}2\pi} \sum_{k=A}^C \dot{I}_k \left[ \ln \frac{\sqrt{2}\delta_3}{\sqrt{a_{T1k}^2 + (h_k - h_{T1})^2}} - j\frac{\pi}{4} + \frac{2h_k + h_{T1}}{3\delta_3}(1+j) - 0,0772 \right], \text{ В/км,}$$

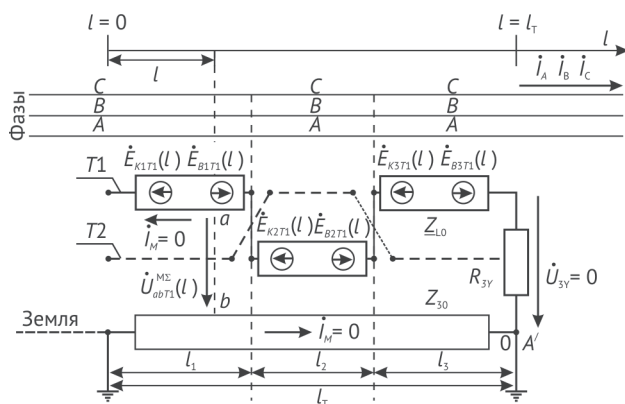


Рис. 15. Схема определения напряжения  $\dot{U}_{abT1}^{MS}(l)$  на тросе Т1, установленном с транспозицией



$$\dot{E}_{KT20} = -\frac{j\omega\mu_0}{10^{-3}2\pi} \sum_{k=A}^C \dot{I}_k \left[ \ln \frac{\sqrt{2}\delta_3}{\sqrt{a_{T2k}^2 + (h_k - h_{T2})^2}} - j\frac{\pi}{4} + \frac{2}{3} \frac{h_k + h_{T2}}{\delta_3} (1+j) - 0,0772 \right], \text{ В/км.} \quad (15)$$

Удельная вихревая ЭДС  $\dot{E}_{BT0}$  определяется по уравнениям (9) (13).

ЭДС на 1-м, 2-м и 3-м шагах транспозиции описываются уравнениями:

на 1-м шаге:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{K1T1}(l) &= \dot{E}_{KT10}(l_1 - l), \\ \dot{E}_{B1T1}(l) &= \dot{E}_{BT0}(l_1 - l); \end{aligned}$$

на 2-м шаге:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{K2T1}(l) &= \dot{E}_{KT20}(l_1 + l_2 - l), \\ \dot{E}_{B2T1}(l) &= \dot{E}_{BT0}(l_1 + l_2 - l); \end{aligned}$$

на 3-м шаге:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{K3T1}(l) &= \dot{E}_{KT10}(l_1 + l_2 + l_3 - l), \\ \dot{E}_{B3T1}(l) &= \dot{E}_{BT0}(l_1 + l_2 + l_3 - l). \end{aligned}$$

Напряжение  $\dot{U}_{ab3T1}^{M\Sigma}(l)$  на третьем шаге транспозиции троса Т1:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{ab3T1}^{M\Sigma}(l) &= \dot{E}_{K3T1}(l) - \dot{E}_{B3T1}(l) = \\ &= (\dot{E}_{KT10} - \dot{E}_{BT0})(l_1 + l_2 + l_3 - l), \end{aligned} \quad (16)$$

где  $l$  изменяется от  $l_1 + l_2$  до  $l_1 + l_2 + l_3$ .

Напряжение  $\dot{U}_{ab2T1}^{M\Sigma}(l)$  на втором шаге транспозиции троса Т1:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{ab2T1}^{M\Sigma}(l) &= \dot{E}_{K2T1}(l) + \dot{E}_{B2T1}(l) = \\ &= (\dot{E}_{KT20} + \dot{E}_{BT0})(l_1 + l_2 - l) + \dot{U}_{ab3T1}^{M\Sigma}(l_1 + l_2), \end{aligned} \quad (17)$$

где  $l$  изменяется от  $l_1$  до  $l_1 + l_2$ .

Напряжение  $\dot{U}_{ab1T1}^{M\Sigma}(l)$  на первом шаге транспозиции троса Т1:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{ab1T1}^{M\Sigma}(l) &= \dot{E}_{K1T1}(l) - \dot{E}_{B1T1}(l) = \\ &= (\dot{E}_{KT10} - \dot{E}_{BT0})(l_1 - l) + \dot{U}_{ab2T1}^{M\Sigma}(l_1), \end{aligned} \quad (18)$$

где  $l$  изменяется от 0 до  $l_1$ .

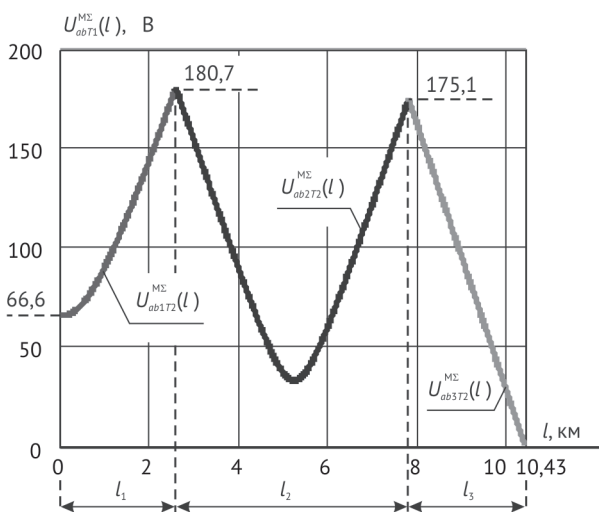
На рис. 16 показано распределение модуля и аргумента напряжения  $\dot{U}_{abT1}^{M\Sigma}(l)$  вдоль троса Т1 при рабочих токах:  $\dot{I}_A = 705 \text{ А}$ ,  $\dot{I}_B = 705 \angle -120^\circ \text{ А}$  и  $\dot{I}_C = 705 \angle 120^\circ \text{ А}$ .

В начале третьего шага транспозиции  $\dot{U}_{abT1}^{M\Sigma} = 175,1 \text{ В}$ , в начале второго  $\dot{U}_{abT1}^{M\Sigma} = 180,7 \text{ В}$ , а на разомкнутом конце троса Т1  $\dot{U}_{abT1}^{M\Sigma} = 66,6 \text{ В}$ .

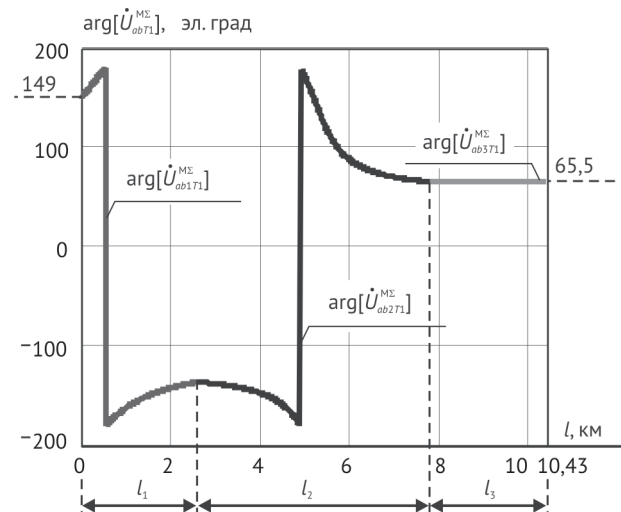
#### 4.3. ГТ с транспозицией, режим однофазного короткого замыкания

Модуль расчетного установившегося тока однофазного КЗ составляет 11500 А. Значения модулей токов в неповрежденных фазах 705 А. На рис. 17 показано распределение модуля напряжения  $\dot{U}_{abT1}^{M\Sigma}(l)$  вдоль троса Т1 при однофазных КЗ фаз А, В и С.

При однофазных КЗ фаз наибольшее значение напряжения достигается на разомкнутом конце троса Т1 и составляет 27,2 кВ для КЗ фаз А и С и 28,3 кВ для КЗ фаз В.



а



б

Рис. 16. Распределение модуля (а) и аргумента (б) напряжения  $\dot{U}_{abT1}^{M\Sigma}(l)$  вдоль троса Т1

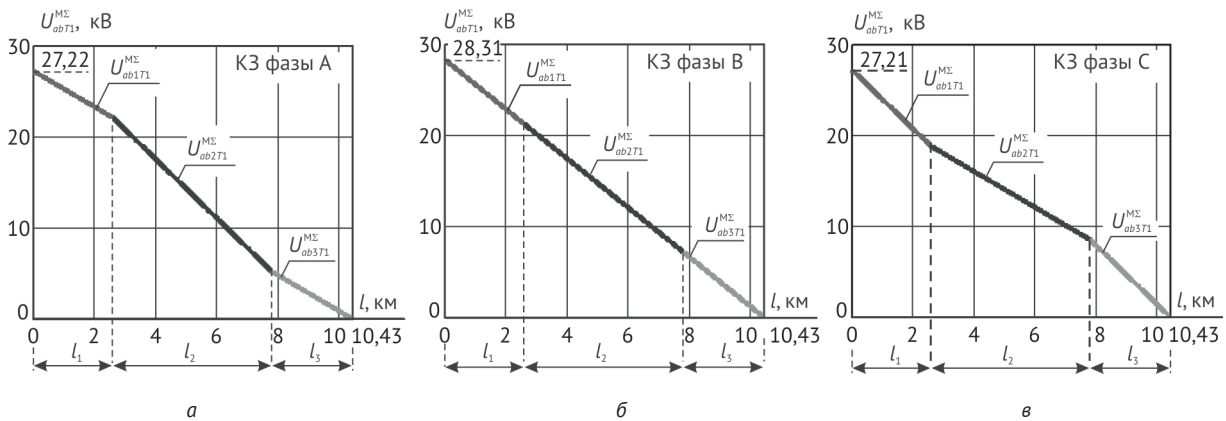


Рис. 17. Распределение модуля напряжения  $\dot{U}_{abT1}^{MS}(l)$  вдоль троса Т1 при однофазном КЗ фаз А (а), В (б) и С (в)

### 5. Заключение

На участке установленного без транспозиции и заземленного на одном конце ГТ протяженностью  $l_T = 10,43$  км ЭП фаз ВЛ 750 кВ относительно земли наводится напряжение  $\dot{U}_{abT1}(l)$ , изменяющееся от 7,9 В на незаземленном до 12,8 В на заземленном конце, что значительно меньше напряжения  $\dot{U}_{abT1}^{MS}(l)$ , создаваемого МП токов той же линии (см. рис. 7 и 13, в).  $\dot{U}_{abT1}(l)$  становится заметным на заземленном конце троса, где  $\dot{U}_{abT1}(l_T) = 12,8$  В, а  $\dot{U}_{abT1}^{MS}(l_T) = 0$ . Транспозиция тросов Т1 и Т2 приведет к еще большему снижению значения модуля напряжения  $\dot{U}_{abT1}(l)$ .

Напряжения относительно земли  $\dot{U}_{abT1}^{MS}(l)$  и  $\dot{U}_{abT2}^{MS}(l)$ , наводимые МП токов фаз ВЛ 750 кВ в установленных без транспозиции и заземленных на одном конце ГТ протяженностью  $l_T = 10,43$  км, в симметричном режиме работы линии при  $I_\Phi = 705$  А имеют наибольшие значения модуля на незаземленном конце тросов (см. рис. 13, в) и составляют  $U_{abT1}^{MS}(0) = U_{abT2}^{MS}(0) = 699,7$  В. Комплекс-векторы этих напряжений сдвинуты относительно друг друга на  $191^\circ$ , а их аргументы по всей длине тросов составляют  $\arg[\dot{U}_{abT1}^{MS}(l)] = 65,5^\circ$  и  $\arg[\dot{U}_{abT2}^{MS}(l)] = -125,5^\circ$ .

Для той же конструкции тросов при однофазных КЗ с модулем тока КЗ 11500 А в поврежденной фазе и модулями токов неповрежденных фаз 705 А наибольшее значение модуля напряжения  $\dot{U}_{abT1}^{MS}(l)$  достигается на незаземленном конце троса Т1 и составляет:  $U_{abT1A}^{MS}(0) = 20,6$  кВ — КЗ фазы А,  $U_{abT1B}^{MS}(0) = 28,5$  кВ — КЗ фазы В и  $U_{abT1C}^{MS}(0) = 33,8$  кВ — КЗ фазы С. Для троса Т2 значения  $U_{abT1A}^{MS}(0)$  и  $U_{abT1C}^{MS}(0)$  меняются местами.

При установке тросов Т1 и Т2 с транспозицией картина изменения напряжения  $\dot{U}_{abT1}^{MS}(l)$  изменяется: на незаземленном конце троса  $U_{abT1}^{MS}(l) = 66,6$  В, но в начале и конце второго шага транспозиции  $U_{abT1}^{MS}(l)$  увеличивается до 180,7 и 175,1 В, соответственно. При однофазных КЗ значения модулей напряжения на не-

заземленном конце троса Т1 сближаются:  $U_{abT1A}^{MS}(0) = 27,2$  кВ — КЗ фазы А,  $U_{abT1B}^{MS}(0) = 28,3$  кВ — КЗ фазы В и  $U_{abT1C}^{MS}(0) = 27,2$  кВ — КЗ фазы С.

Наличие достаточно высокого напряжения на ГТ в симметричном режиме работы линии требует при проведении работ под напряжением с выходом на ГТ соблюдения регламента операций, соответствующих выходу на не отключенную фазу, или, если это возможно, заземления троса в месте выхода по схеме работы с проводом, находящимся под наведенным напряжением.

Для предотвращения пробоя ИПТ, шунтирующего изоляторное крепление троса, необходимо соблюдать условия [9]  $E_T \leq 0,5U_{раз}$ , где  $U_{раз}$  — разрядное напряжение ИПТ,  $E_T$  — ЭДС, наводимая в тросе переменной составляющей тока КЗ. Для одного изолятора, шунтированного искровым промежутком 40 мм,  $U_{раз} = 36$  кВ [9], тогда  $E_T = 18$  кВ. В нашем случае  $E_T = U_{abT1k}^{MS}(0) = 18$  кВ.

Напряжение  $U_{abT1k}^{MS}(0)$  на ИПТ1 и ИПТ2 при однофазном КЗ не должно превышать 18 кВ. В противном случае произойдет пробой искровых промежутков тросов, что нежелательно, как для нарушения изоляции тросов, так и для персонала, проводящего работы на высоте под напряжением, для которого неожиданным пробой ИПТ является экстремальным стрессующим психологическим воздействием.

В рассмотренных вариантах расположения тросов Т1 и Т2 протяженностью  $l_T = 10,43$  км при однофазных КЗ напряжение на их разомкнутых концах  $U_{abT1k}^{MS}(0)$  превышает 18 кВ. Для снижения величины напряжения  $U_{abT1k}^{MS}(0)$  следует уменьшить практически в 2 раза протяженность заземленных на одном конце участков тросов, приняв  $l_T = 5,2$  км, в результате чего значение напряжения  $U_{abT1k}^{MS}(0)$  также уменьшится практически в 2 раза. На рис. 18 показано распределение модулей ЭДС  $\dot{E}_{KT1}(l)$ ,  $\dot{E}_{BT1}(l)$  и напряжения  $\dot{U}_{abT1}^{MS}(l)$  при однофазных КЗ фаз А, В и С вдоль троса Т1 протяженностью  $l_T = 5,2$  км, установленного без транспозиции, а на рис. 19 — с транспозицией тросов Т1 и Т2.

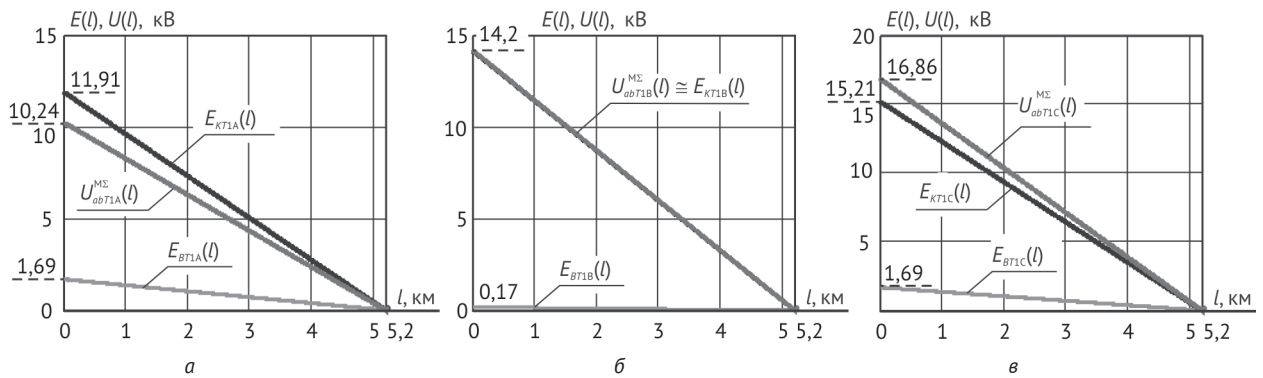


Рис. 18. Распределение модулей ЭДС  $\dot{E}_{KT1}(l)$ ,  $\dot{E}_{BT1}(l)$  и напряжения  $\dot{U}_{abT1}^{MS}(l)$  при КЗ фазы А (а), В (б) С (в) вдоль троса Т1 протяженностью  $l_T = 5,2$  км, установленного без транспозиции тросов Т1 и Т2

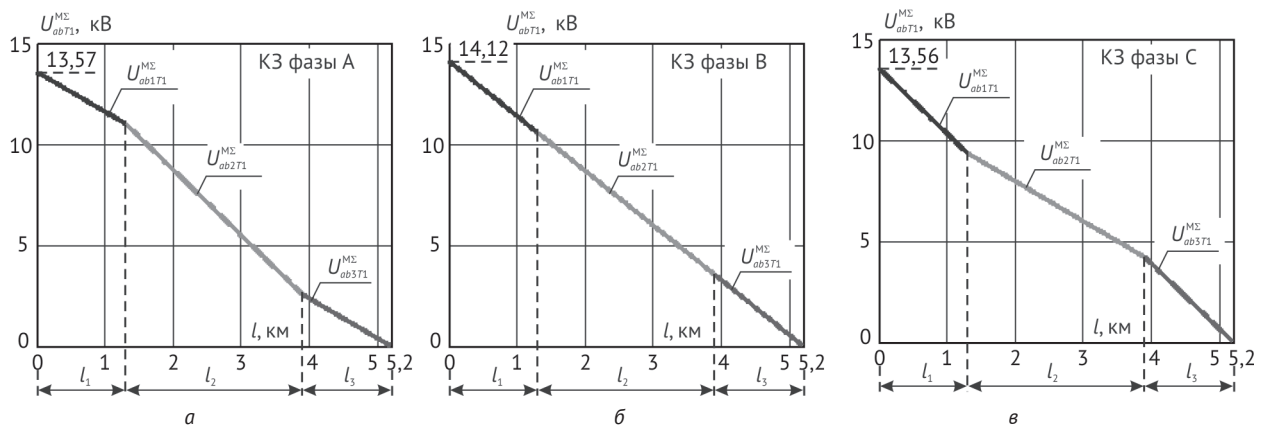


Рис. 19. Распределение модуля напряжения  $\dot{U}_{abT1}^{MS}(l)$  при КЗ фазы А (а), В (б) С (в) вдоль троса Т1 протяженностью  $l_T = 5,2$  км, установленного с транспозицией тросов Т1 и Т2

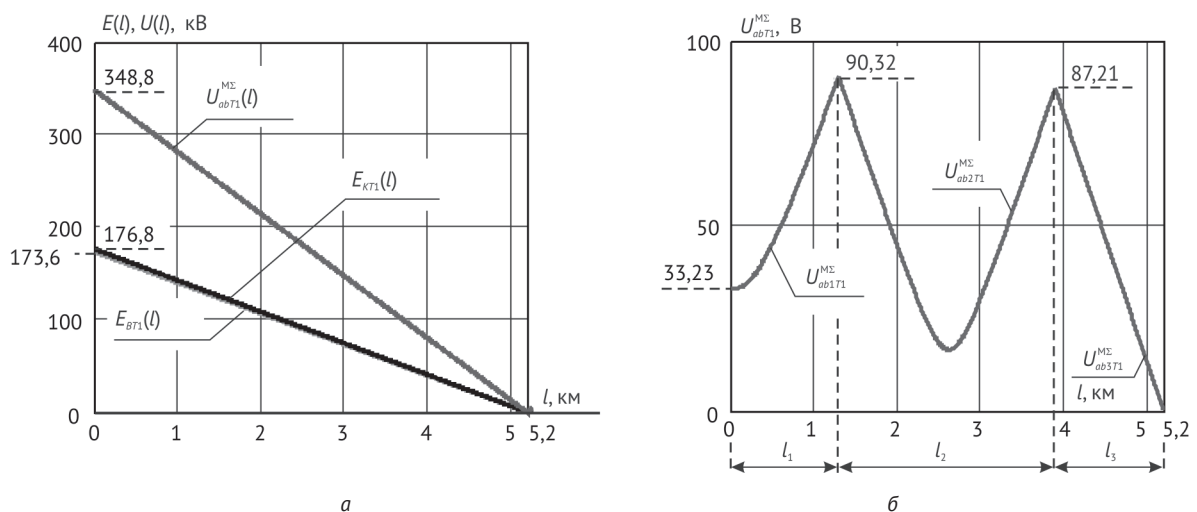


Рис. 20. Распределение модулей ЭДС  $\dot{E}_{KT1}(l)$ ,  $\dot{E}_{BT1}(l)$  и напряжения  $\dot{U}_{abT1}^{MS}(l)$  вдоль участка троса Т1 протяженностью 5,2 км без транспозиции (а) и с транспозицией тросов Т1 и Т2 (б)

Для тросов, установленных без транспозиции, при КЗ фазы А  $\dot{U}_{abT1A}^{M\Sigma}(0)$  уменьшилось с 20,6 до 10,24 кВ, при КЗ фазы В  $\dot{U}_{abT1B}^{M\Sigma}(0)$  — с 28,5 до 14,2 кВ и при КЗ фазы С  $\dot{U}_{abT1C}^{M\Sigma}(0)$  — с 33,8 до 16,86 кВ.

Для тросов, установленных с транспозицией, при КЗ фазы А модуль напряжения  $\dot{U}_{abT1}^{M\Sigma}(0)$  уменьшился

с 27,22 до 13,57 кВ, при КЗ фазы В — с 28,31 до 14,12 кВ и при КЗ фазы С — с 27,21 до 13,56 кВ.

Уменьшение значений напряжения  $\dot{U}_{abT1}^{M\Sigma}(l)$  происходит и в симметричном режиме работы ВЛ 750 кВ, что показано на рис. 20, а без транспозиции и на рис. 20, б — с транспозицией тросов Т1 и Т2.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Костенко М.В., Перельман Л.С., Шкарин Ю.П. Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях высокого напряжения. М.: Энергия, 1973. 272 с.
2. Цицикян Г.Н. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике. СПб: Элмор, 2007. — 184 с.
3. Мисриханов М.Ш., Токарский А.Ю. Учет проводимости земли при определении ЭДС, наведенных в параллельных воздушных линиях электропередачи // ЭЛЕКТРО. 2010. № 3. — С. 13–18.
4. Мисриханов М.Ш., Токарский А.Ю. Определение ЭДС, наведенных в параллельных воздушных линиях электропередачи, с учетом проводимости земли // Новое в Российской электроэнергетике. 2010. № 7. — С. 29–40.
5. РД 34.20.504–94. Типовая инструкция по эксплуатации воздушных линий электропередачи напряжением 35–800 кВ / РАО энергетики и электрификации «ЕЭС России», Департамент электрических сетей, 1996. — 126 с.
6. Мисриханов М.Ш., Иостсон Ю.А., Рубцова Н.Б., Токарский А.Ю. Электромагнитные параметры воздушных линий электропередачи (ЭМП ВЛ)/ Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2006613744, 27.10.2006 // Программы для ЭВМ, базы данных и топология интегральных микросхем. Официальный бюллетень федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и торговым знакам. № 1 (58). М.: ФГУ ФИПС, 2007.
7. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники Т. 2. Л.: Энергия, 1967. 408 с.
8. Токарский А.Ю., Рубцова Н.Б. Распределение напряжения вдоль отключенной и заземленной линии, наведенного электрическим полем параллельной линии // Безопасность в техносфере. 2015. № 2(53). — С. 48–55.
9. Зеличенко А. С., Смирнов Б.И. Проектирование механической части воздушных линий сверхвысокого напряжения. М.: Энергоиздат, 1981. — 336 с.

## REFERENCES

1. Kostenko M.V., Perelman L.S., Shkarin Yu.P. Wave processes and electrical interference in a multi-wire high voltage lines. Moscow, Energia [Energy], 1973. 272 p. (in Russian)
2. Tsitsikjan G.N. Electromagnetic compatibility in electric power industry. St. Petersburg, JELMOR Publ., 2007. 184 p. (in Russian)
3. Misrikhanov M.Sh., Tokarskiy A.Yu. Accounting for the ground conductivity under voltage induced in the parallel overhead transmission lines determining. JeLEKTRO.2010, I. 3, pp.13-18. (in Russian)
4. Misrikhanov M.Sh. Tokarskiy A.Yu. *Opreделение JeDS, navedennyh v paral-lel'nyh vozdushnyh liniyah jelektroperedachi, s uchetom provodimosti zemli. Novoe v Rossijskoj jelektroenergetike* [Determination of the EMF induced in parallel overhead power lines in ground conductivity. New in the Russian power industry], 2010, I. 7, «Jenergo-press» Publ., p. 29–40.
5. RD 34.20.504-94. *Tipovaja instrukcija po jekspluatácii vozdushnyh linij jelektroperedachi naprjazheniem 35-800 kV. RAO jenergetiki i jelektifikacii «EJeS Rossii», Departament jelektricheskijh setej* [RD 34.20.504-94. Typical manual overhead power lines of 35-800 kV. RAO Energy and Electrification "UES of Russia", the Department of Electrical Networks]. 1996. 126 p.
6. Misrikhanov M.Sh., Iostson Yu.A., Rubtsova N.B., Tokarskiy A.Yu. Jelektromagnitnye parametry vozdushnyh linij jelektroperedachi (JeMP VL). Svidetel'stvo ob oficial'noj registracii programmy dlja JeVM № 2006613744, 27.10.2006 [The electromagnetic parameters of overhead transmission lines (overhead lines EMF). Certificate of official registration of the computer number 2006613744, 27.10.2006]. *Programmy dlja JeVM, bazy dannyh i topologija integral'nyh mikroshem. Oficial'nyj bjulleten' federal'noj sluzhby po intellektual'noj sobstvennosti, patentam i torgovym znakam* [Computer programs, databases and topology of integrated circuits. Official Bulletin of the Federal Service for Intellectual Property, Patents and Trademark Office. № 1 (58)]. I. 1 (58). Moscow, FGU FIPS Publ., 2007.
7. Nejman L.R., Demirchjan K.S. *Teoreticheskie osnovy jelektrotehniki* [Theoretical Foundations of Electrical Engineering]. V. 2. Leningrad, Jenergija Publ., 1967, 408 p.
8. Tokarskiy A.Yu., Rubtsova N.B. Raspredelenie naprjazhenija vdol' otkljuchennoj i zazemlennoj linii, navedennogo jelektricheskim polem paral-lel'noj linii [The voltage distribution along the line disconnected and earthed, the induced electric field parallel to the line]. *Bezopasnost' v tehnosfere* [Safety in Technosphere]. 2015, I. 2(53), pp. 48–55.
9. Zelichenko A.S., Smirnov B.I. *Proektirovanie mehanicheskoi chasti vozdushnyh linij sverhvyssokogo naprjazhenija* [Designing a mechanical part of overhead lines EHV]. Moscow, Jenergoizdat Publ., 1981, 336 p.

## Voltages Induced in Overhead Ground-Wire Cable as Risk Factor. Part 1

**A.Yu. Tokarsky**, Doctor of Engineering, Associate Professor, Team Manager, FSBSI Research Institute of Occupational Health, Moscow, Leading Expert, OJSC Research and Development Center at Federal Grid Company of Unified Energy System, Moscow

**N.B. Rubtsova**, Doctor of Biology, Professor, Head of Department, FSBSI Research Institute of Occupational Health, Moscow

**V.N. Ryabchenko**, Doctor of Engineering, Professor, Chief Technologist of Automatic Control System, OJSC Research and Development Center at Federal Grid Company of Unified Energy System, Moscow

*To ensure the staff safety under hot-line overhead transmission line (OTL) maintenance, as well as overhead ground-wire cable (OGWC) insulation integrity maintaining, by the example of three-phase 750 kV OTL has been presented an algorithm for calculation of voltages and electromotive forces (EMF) induced in this line's OGWC by electric and magnetic fields (EF and MF) generated by OTL phases' voltages and currents. Algorithms for calculation of line-to-earth voltages distribution along grounded at one end OGWC' intervals have been given. It has been shown that the voltage induced at OGWC by EF of 750 kV OTL is much less than the voltage induced by this OTL's MF. For single-phase short circuits modes has been presented an algorithm for selection of grounded at one end OGWC' interval length by condition of respecting of voltage's maximum permissible level on a spark gap shunting OGWC's insulator set.*

**Keywords:** three-phase overhead transmission line, overhead ground-wire cables, symmetric mode, single-phased short circuit, electric and magnetic field, induced voltage distribution.

### В Минобрнауки России о диссертационных исследованиях

С 2013 года были внесены изменения в нормативную базу, касающуюся государственной научной аттестации, вступили в силу новый порядок присвоения ученых званий (Постановление Правительства РФ № 1139), порядок присуждения ученых степеней (Постановление Правительства РФ № 842). Минобрнауки России утвердило Положение о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (приказ Минобрнауки России № 7). Модернизация системы аттестации научных кадров в России направлена на повышение эффективности системы через ее прозрачность, открытость, высокий уровень экспертизы. Минобрнауки России не планирует ограничивать возможность защиты диссертации специальностью, указанной в дипломе специалиста или магистра. В 2016 году Правительством РФ было утверждено новое Положение о Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки Российской Федерации (Постановление Правительства РФ № 237). В нем отражены изменения следующего характера:

- состав Комиссии утверждается сроком на 3 года. В последующем состав Комиссии подлежит обновлению не менее чем на 50 процентов. При этом член Комиссии не может исполнять свои функции более 2-х сроков подряд;
- полномочия всего состава Комиссии либо отдельных членов Комиссии, включая руководство Комиссии, могут быть прекращены досрочно;
- членами президиума Комиссии не могут быть лица, замещающие должности руководителей организаций, за исключением лиц, обеспечивающих

деятельность по вопросам, связанным со сведениями, составляющими государственную тайну.

В рамках систематической работы по повышению качества государственной научной аттестации, Минобрнауки России разработало и внесло в Правительство проект постановления о внесении изменений в Положение о присуждении ученых степеней. Изменения, среди прочего, оптимизируют процесс государственной научной аттестации, повысят уровень ее прозрачности, так как предусматривают следующие новшества:

- научные работники могут подготовить кандидатскую диссертацию на рабочем месте без обучения в аспирантуре или прикрепления к организации;
- для дополнительной защиты прав лиц, подготовивших диссертацию, установлен срок, в течение которого организация, где выполнялась диссертация, обязана выдать им заключение по диссертации, а для самих заключений введен 3-летний срок действия;
- на обеспечение процедуры прозрачности защиты направлено увеличение срока доступа в интернете к тексту диссертации (с 9 до 12 месяцев по докторской диссертации и с 7 до 10 — по кандидатской);
- экспертные советы теперь могут приглашать на свои заседания соискателей ученых степеней и иных лиц, имеющих отношение к существу рассматриваемых на заседании вопросов, что существенно снизит нагрузку на ВАК, на заседания которого в настоящее время приглашаются указанные лица.

*Источник: сайт Минобрнауки России*