

# Напряжения на грозозащитном тросе воздушной линии электропередачи как фактор риска. Часть 2<sup>1</sup>

**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, волоконно-оптическая линия связи, однофазное короткое замыкание, электробезопасность

*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, электродвижущих сил и токов, наведенных магнитным полем токов однофазного короткого замыкания (КЗ) ВЛ в заземленном в одной точке ГТ1 и заземленном на каждой опоре ГТ2, выполняющим функцию волоконно-оптической линии связи. Для режимов однофазных КЗ дан алгоритм выбора длины заземленного на одном конце участка ГТ1 по условию соблюдения предельно допустимого уровня напряжения на искровом промежутке, шунтирующем изолирующую подвеску ГТ1.*

## 1. Введение

На грозозащитном тросе (ГТ) работающей воздушной линии (ВЛ) электропередачи наводятся напряжения, создаваемое электрическим полем (ЭП) находящихся под напряжением фаз ВЛ, и электродвижущие силы (ЭДС), индуцируемые магнитным полем (МП) токов, протекающих в этих фазах.

В первой части статьи [1] было показано, что на заземленном на одном конце ГТ напряжения, наводимые ЭП фаз, намного меньше ЭДС, наводимых МП токов этих фаз, особенно в режимах однофазных коротких замыканий (КЗ). Также показано, что если ГТ заземлен на одном конце, то на другом незаземленном его конце на искровом промежутке (ИП), шунтирующем изолирующую подвеску троса, при однофазном КЗ ВЛ может наводиться напряжение, превышающее предельно допустимое значение, а это

приводит к пробоем ИП и неблагоприятному воздействию как на персонал, проводящий работы под напряжением, так и на изоляцию ГТ.

Если один из двух ГТ выполняет дополнительную функцию волоконно-оптической линии связи (ВОЛС), то он должен заземляться на каждой опоре, что приводит к протеканию в этом тросе токов, наводимых МП фазных токов линии, и величина этих наводимых токов может достигать кА при однофазных КЗ ВЛ. Падение напряжений на сопротивлениях ГТ2 от наводимых токов участвует в формировании напряжения на ИП ГТ1 наравне с ЭДС, наведенных в обоих тросах ВЛ.

Величины наводимых на ГТ напряжений, ЭДС и токов необходимо знать для обеспечения как безопасности персонала, проводящего на ВЛ работы под напряжением, так и для обеспечения целостности подвесной изоляции этих тросов.

<sup>1</sup> Начало см. «Безопасность в техносфере», 2016, №1, с. 28–40.



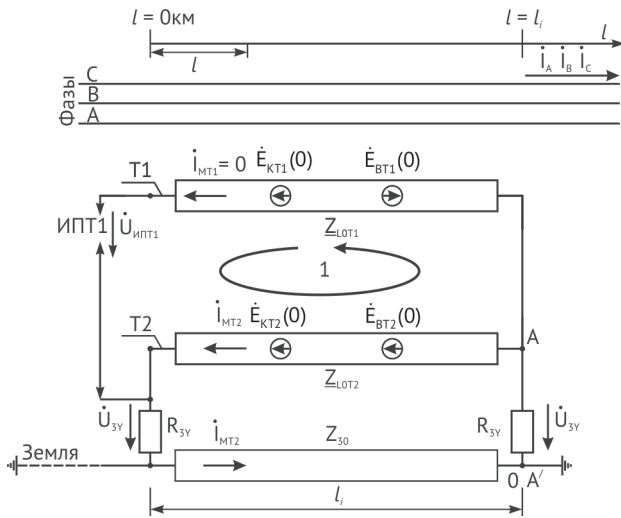


Рис. 2. ВЛ 750 кВ с тросом Т2, заземленным на концах участка протяженностью  $l_i = 10,43$  км

$$\dot{U}_{ИПТ1} - \dot{I}_{МТ2} Z_{ЛОТ2} l_i = -\dot{E}_{КТ2}(0) - \dot{E}_{ВТ2}(0) - \dot{E}_{ВТ1}(0) + \dot{E}_{КТ1}(0),$$

откуда напряжение на ИП троса Т1 при КЗ одной из фаз определяется выражением:

$$\dot{U}_{ИПТ1} = \dot{E}_{КТ1}(0) - \dot{E}_{КТ2}(0) - \dot{E}_{ВТ2}(0) - \dot{E}_{ВТ1}(0) + \dot{I}_{МТ2} Z_{ЛОТ2} l_i. \quad (3)$$

В табл. 1 даны значения ЭДС  $\dot{E}_{КТ1}(0)$ ,  $\dot{E}_{КТ2}(0)$ ,  $\dot{E}_{ВТ}(0)$ , тока  $\dot{I}_{МТ2}$  и напряжения  $\dot{U}_{ИПТ1}$  (модуль  $\angle$  аргумент) при однофазном КЗ фаз А, В и С с модулем тока КЗ 11,5 кА.

#### 4. Трос Т2 заземлен в 13 местах без транспозиции тросов

##### 4.1. Значения сопротивления всех заземляющих устройств (ЗУ) 10 Ом

Рассмотрим вариант, когда трос Т2, протяженностью  $3 \times l_i$ , заземлен в 13 местах при  $l_i = 10,43$  км. Схема расположения фаз и тросов ВЛ 750 кВ показана на рис. 3.

На рис. 3:

$$l_i = 10,43 \text{ км}, l_1 = l_2 = l_3 = \dots = l_{10} = l_{11} = l_{12} = l_n = 2,6075 \text{ км};$$

Таблица 1

Значения ЭДС  $\dot{E}_{КТ1}(0)$ ,  $\dot{E}_{КТ2}(0)$ ,  $\dot{E}_{ВТ}(0)$ , тока  $\dot{I}_{МТ2}$  и напряжения  $\dot{U}_{ИПТ1}$  при однофазном КЗ фаз А, В и С с модулем тока КЗ 11,5 кА

	КЗ фазы А	КЗ фазы В	КЗ фазы С
$\dot{E}(0)$ , кВ	$\dot{E}_{КТ1}(0) = 23,88 \angle -102,4^\circ;$ $\dot{E}_{КТ2}(0) = 30,58 \angle -100,3^\circ;$ $\dot{E}_{ВТ}(0) = 3,385 \angle -92,9^\circ.$	$\dot{E}_{КТ1}(0) = 28,38 \angle 138,7^\circ;$ $\dot{E}_{КТ2}(0) = 28,25 \angle 140,0^\circ;$ $\dot{E}_{ВТ}(0) = 0,348 \angle 120^\circ.$	$\dot{E}_{КТ1}(0) = 30,50 \angle 20,6^\circ;$ $\dot{E}_{КТ2}(0) = 23,93 \angle 17,1^\circ;$ $\dot{E}_{ВТ}(0) = 3,385 \angle 147,1^\circ.$
$\dot{I}_{МТ2}$ , кА	$1,026 \angle -113,3^\circ$	$0,853 \angle 126,9^\circ$	$0,626 \angle 0,8^\circ$
$\dot{U}_{ИПТ1}$ , кВ	$3,430 \angle -10,8^\circ$	$11,81 \angle 154,5^\circ$	$22,33 \angle 33,7^\circ$

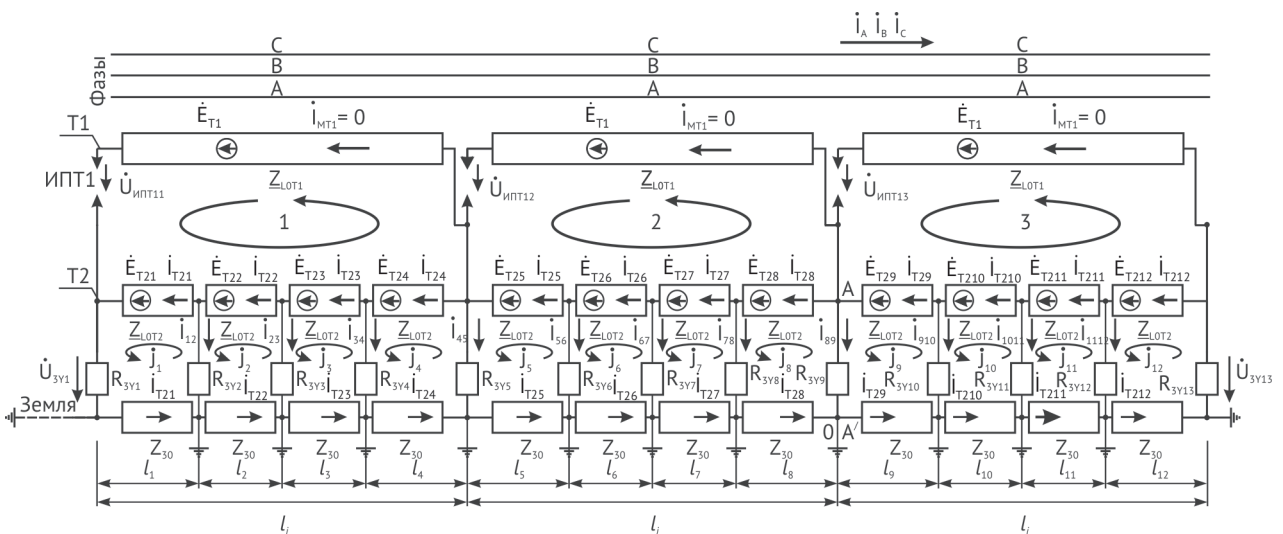


Рис. 3. ВЛ 750 кВ без транспозиции тросов, с тросом Т2, заземленным в 13 местах участка протяженностью  $3 \times l_i$  при  $l_i = 10,43$  км

$$\underline{Z}_{\Lambda 0 T 2} = R_{0 \text{ OKGT}} + j \text{Im}[\underline{Z}_{T 2 T 2 0}] = 1,116 + j0,7547 \text{ Ом/км};$$

$$Z_{30} = \text{Re}[\underline{Z}_{T 2 T 2 0}] = \text{Re}[\underline{Z}_{T 1 T 1 0}] = 0,0457 \text{ Ом/км};$$

сопротивление всех ЗУ  $R_{3Y} = 10 \text{ Ом};$

$$\begin{aligned} \dot{E}_{T 2 n} &= \dot{E}_{T 2 1} = \dot{E}_{T 2 2} = \dot{E}_{T 2 3} = \dots = \dot{E}_{T 2 1 0} = \dot{E}_{T 2 1 1} = \dot{E}_{T 2 1 2} = \\ &= \frac{1}{4}(\dot{E}_{\text{КТ} 2}(0) + \dot{E}_{\text{ВТ} 2}(0)); \dot{E}_{T 1} = \dot{E}_{\text{КТ} 1}(0) - \dot{E}_{\text{ВТ} 1}(0). \end{aligned}$$

Для контуров  $\dot{J}_1, \dot{J}_2, \dot{J}_3, \dots, \dot{J}_{10}, \dot{J}_{11}, \dot{J}_{12}$  (см. рис. 3) по методу контурных токов:

$$\left. \begin{aligned} &\dot{J}_1[(\underline{Z}_{\Lambda 0 T 2} + Z_{30})l_1 + 2R_{3Y}] - \dot{J}_2 R_{3Y} + \dot{J}_3 \cdot 0 + \dots + \\ &+ \dot{J}_{12} \cdot 0 = \dot{E}_{T 2 1}; \\ &-\dot{J}_1 R_{3Y} + \dot{J}_2[(\underline{Z}_{\Lambda 0 T 2} + Z_{30})l_2 + 2R_{3Y}] - \dot{J}_3 R_{3Y} + \\ &+ \dot{J}_4 \cdot 0 + \dots + \dot{J}_{12} \cdot 0 = \dot{E}_{T 2 2}; \\ &\dot{J}_1 \cdot 0 - \dot{J}_2 R_{3Y} + \dot{J}_3[(\underline{Z}_{\Lambda 0 T 2} + Z_{30})l_3 + 2R_{3Y}] - \dot{J}_4 R_{3Y} + \\ &+ \dot{J}_5 \cdot 0 + \dots + \dot{J}_{12} \cdot 0 = \dot{E}_{T 2 3}; \\ &\dot{J}_1 \cdot 0 + \dot{J}_2 \cdot 0 - \dot{J}_3 R_{3Y} + \dot{J}_4[(\underline{Z}_{\Lambda 0 T 2} + Z_{30})l_4 + 2R_{3Y}] - \\ &-\dot{J}_5 R_{3Y} + \dot{J}_6 \cdot 0 + \dots + \dot{J}_{12} \cdot 0 = \dot{E}_{T 2 4}; \\ &\dot{J}_1 \cdot 0 + \dots + \dot{J}_3 \cdot 0 - \dot{J}_4 R_{3Y} + \dot{J}_5[(\underline{Z}_{\Lambda 0 T 2} + Z_{30})l_5 + 2R_{3Y}] - \\ &-\dot{J}_6 R_{3Y} + \dot{J}_7 \cdot 0 + \dots + \dot{J}_{12} \cdot 0 = \dot{E}_{T 2 5}; \\ &\dot{J}_1 \cdot 0 + \dots + \dot{J}_4 \cdot 0 - \dot{J}_5 R_{3Y} + \dot{J}_6[(\underline{Z}_{\Lambda 0 T 2} + Z_{30})l_6 + 2R_{3Y}] - \\ &-\dot{J}_7 R_{3Y} + \dot{J}_8 \cdot 0 + \dots + \dot{J}_{12} \cdot 0 = \dot{E}_{T 2 6}; \\ &\dot{J}_1 \cdot 0 + \dots + \dot{J}_5 \cdot 0 - \dot{J}_6 R_{3Y} + \dot{J}_7[(\underline{Z}_{\Lambda 0 T 2} + Z_{30})l_7 + 2R_{3Y}] - \\ &-\dot{J}_8 R_{3Y} + \dot{J}_9 \cdot 0 + \dots + \dot{J}_{12} \cdot 0 = \dot{E}_{T 2 7}; \\ &\dot{J}_1 \cdot 0 + \dots + \dot{J}_6 \cdot 0 - \dot{J}_7 R_{3Y} + \dot{J}_8[(\underline{Z}_{\Lambda 0 T 2} + Z_{30})l_8 + 2R_{3Y}] - \\ &-\dot{J}_9 R_{3Y} + \dot{J}_{10} \cdot 0 + \dots + \dot{J}_{12} \cdot 0 = \dot{E}_{T 2 8}; \\ &\dot{J}_1 \cdot 0 + \dots + \dot{J}_7 \cdot 0 - \dot{J}_8 R_{3Y} + \dot{J}_9[(\underline{Z}_{\Lambda 0 T 2} + Z_{30})l_9 + 2R_{3Y}] - \\ &-\dot{J}_{10} R_{3Y} + \dot{J}_{11} \cdot 0 + \dot{J}_{12} \cdot 0 = \dot{E}_{T 2 9}; \\ &\dot{J}_1 \cdot 0 + \dots + \dot{J}_8 \cdot 0 - \dot{J}_9 R_{3Y} + \dot{J}_{10}[(\underline{Z}_{\Lambda 0 T 2} + Z_{30})l_{10} + 2R_{3Y}] - \\ &-\dot{J}_{11} R_{3Y} + \dot{J}_{12} \cdot 0 = \dot{E}_{T 2 1 0}; \\ &\dot{J}_1 \cdot 0 + \dots + \dot{J}_9 \cdot 0 - \dot{J}_{10} R_{3Y} + \dot{J}_{11}[(\underline{Z}_{\Lambda 0 T 2} + Z_{30})l_{11} + 2R_{3Y}] - \\ &-\dot{J}_{12} R_{3Y} = \dot{E}_{T 2 1 1}; \\ &\dot{J}_1 \cdot 0 + \dots + \dot{J}_{10} \cdot 0 - \dot{J}_{11} R_{3Y} + \\ &+ \dot{J}_{12}[(\underline{Z}_{\Lambda 0 T 2} + Z_{30})l_{12} + 2R_{3Y}] = \dot{E}_{T 2 1 2}. \end{aligned} \right\} (4)$$

$$\dot{I}_{12} = \dot{J}_2 - \dot{J}_1; \dot{I}_{23} = \dot{J}_3 - \dot{J}_2; \dots \dot{I}_{1011} = \dot{J}_{11} - \dot{J}_{10}; \dot{I}_{1112} = \dot{J}_{12} - \dot{J}_{11}.$$

Каждый  $n$ -й из 12 элементов троса Т2 имеет сопротивление:

$$(\underline{Z}_{\Lambda 0 T 2} + Z_{30})l_n + 2R_{3Y} = 23,029 + j1,968 \text{ Ом}.$$

Для напряжения на ИПТ1  $\dot{U}_{\text{ИПТ} 1}$ ,  $\dot{U}_{\text{ИПТ} 1 2}$  и  $\dot{U}_{\text{ИПТ} 1 3}$  контуров 1, 2 и 3 (см. рис.3):

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{\text{ИПТ} 1} &= \dot{E}_{T 1} - \dot{E}_{T 2 1} - \dot{E}_{T 2 2} - \dot{E}_{T 2 3} - \dot{E}_{T 2 4} + \\ &+ \underline{Z}_{\Lambda 0 T 2} l_1 (\dot{I}_{T 2 1} + \dot{I}_{T 2 2} + \dot{I}_{T 2 3} + \dot{I}_{T 2 4}); \\ \dot{U}_{\text{ИПТ} 1 2} &= \dot{E}_{T 1} - \dot{E}_{T 2 5} - \dot{E}_{T 2 6} - \dot{E}_{T 2 7} - \dot{E}_{T 2 8} + \\ &+ \underline{Z}_{\Lambda 0 T 2} l_5 (\dot{I}_{T 2 5} + \dot{I}_{T 2 6} + \dot{I}_{T 2 7} + \dot{I}_{T 2 8}); \\ \dot{U}_{\text{ИПТ} 1 3} &= \dot{E}_{T 1} - \dot{E}_{T 2 9} - \dot{E}_{T 2 1 0} - \dot{E}_{T 2 1 1} - \dot{E}_{T 2 1 2} + \\ &+ \underline{Z}_{\Lambda 0 T 2} l_9 (\dot{I}_{T 2 9} + \dot{I}_{T 2 1 0} + \dot{I}_{T 2 1 1} + \dot{I}_{T 2 1 2}). \end{aligned} \right\} (5)$$

В табл. 2 представлены значения ЭДС  $\dot{E}_{T 1}$ ,  $\dot{E}_{T 2 n}$ , тока  $\dot{I}_{T 2 n}$  и напряжения  $\dot{U}_{\text{ИПТ} 1}$  для троса Т2 протяженностью  $3 \times l_p$ , заземленного в 13 местах, с  $l_i = 10,43 \text{ км}$  при однофазном КЗ фаз А, В и С и модуле тока КЗ 11,5 кА.

#### 4.2. 4.2. Значения сопротивлений крайних ЗУ 0,5 Ом, а внутренних ЗУ 10 Ом

Рассмотрим вариант, когда трос Т2 на концах заземлен на ЗУ подстанций (ПС) с  $R_{3Y \text{ ПС}} = 0,5 \text{ Ом}$ , а по трассе ВЛ — на ЗУ опор с  $R_{3Y} = 10 \text{ Ом}$ . Тогда в первом и последнем уравнениях системы (4) множители

$$\begin{aligned} [(\underline{Z}_{\Lambda 0 T 2} + Z_{30})l_1 + 2R_{3Y}] &= [(\underline{Z}_{\Lambda 0 T 2} + Z_{30})l_{12} + 2R_{3Y}] = \\ &= 23,029 + j1,968 \text{ Ом} \end{aligned}$$

заменяются на

$$\begin{aligned} [(\underline{Z}_{\Lambda 0 T 2} + Z_{30})l_1 + R_{3Y \text{ ПС}} + R_{3Y}] &= \\ = [(\underline{Z}_{\Lambda 0 T 2} + Z_{30})l_{12} + R_{3Y \text{ ПС}} + R_{3Y}] &= 13,529 + j1,968 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

В табл. 3 даны значения ЭДС  $\dot{E}_{T 1}$ ,  $\dot{E}_{T 2 n}$ , тока  $\dot{I}_{T 2 n}$  и напряжения  $\dot{U}_{\text{ИПТ} 1}$  для троса Т2 протяженностью  $3 \times l_p$ , заземленного в 13 местах с  $l_i = 10,43 \text{ км}$  и с сопротивлением крайних ЗУ 0,5 Ом при однофазном КЗ фаз А, В и С и модуле тока КЗ 11,5 кА.

### 5. Трос Т2 заземлен в 13 местах с транспозицией тросов

#### 5.1. Тросы с транспозицией, значения сопротивлений всех ЗУ 10 Ом

Рассмотрим ВЛ 750 кВ с транспозицией тросов по схеме трех первых циклов транспозиции, показанных на рис. 1а. Трос Т2, протяженностью  $3 \times l_p$ , заземлен в 13 местах при  $l_i = 10,43 \text{ км}$ . Схема расположения фаз и тросов ВЛ 750 кВ показана на рис. 4.

На каждом втором и третьем шагах каждого цикла транспозиции тросы Т1 и Т2 меняются местами, что для наглядности схемы отмечено изменением чередования фаз линии снизу вверх с АВС на САВ. В результате изменения положения тросов происходит измене-

Таблица 2

Значения ЭДС  $\dot{E}_{T1}, \dot{E}_{T2n}$ , тока  $\dot{i}_{T2n}$  и напряжения  $\dot{U}_{ИПТ1}$  для троса Т2 протяженностью  $3 \times l_i$  при однофазном КЗ фаз А, В и С с модулем тока КЗ 11,5 кА

–	КЗ фазы А	КЗ фазы В	КЗ фазы С
$\dot{E}_T, \text{кВ}$	$\dot{E}_{T1} = 20,549 \angle -104,0^\circ;$ $\dot{E}_{T2n} = 8,485 \angle -99,6^\circ.$	$\dot{E}_{T1} = 28,450 \angle 138,0^\circ;$ $\dot{E}_{T2n} = 7,048 \angle 140,7^\circ.$	$\dot{E}_{T1} = 33,815 \angle 21,8^\circ;$ $\dot{E}_{T2n} = 5,173 \angle 14,5^\circ.$
$\dot{i}_{T2n}, \text{кА}$	$\dot{i}_{T21} = \dot{i}_{T212} = 1,062 \angle -120,7^\circ;$ $\dot{i}_{T22} = \dot{i}_{T211} = 1,658 \angle -124,1^\circ;$ $\dot{i}_{T23} = \dot{i}_{T210} = 1,986 \angle -126,6^\circ;$ $\dot{i}_{T24} = \dot{i}_{T29} = 2,164 \angle -128,4^\circ;$ $\dot{i}_{T25} = \dot{i}_{T28} = 2,254 \angle -129,5^\circ;$ $\dot{i}_{T26} = \dot{i}_{T27} = 2,291 \angle -130,0^\circ.$	$\dot{i}_{T21} = \dot{i}_{T212} = 0,8823 \angle 119,6^\circ;$ $\dot{i}_{T22} = \dot{i}_{T211} = 1,377 \angle 116,2^\circ;$ $\dot{i}_{T23} = \dot{i}_{T210} = 1,65 \angle 113,7^\circ;$ $\dot{i}_{T24} = \dot{i}_{T29} = 1,797 \angle 111,9^\circ;$ $\dot{i}_{T25} = \dot{i}_{T28} = 1,873 \angle 110,8^\circ;$ $\dot{i}_{T26} = \dot{i}_{T27} = 1,903 \angle 110,3^\circ.$	$\dot{i}_{T21} = \dot{i}_{T212} = 0,6476 \angle -6,6^\circ;$ $\dot{i}_{T22} = \dot{i}_{T211} = 1,0106 \angle -10,0^\circ;$ $\dot{i}_{T23} = \dot{i}_{T210} = 1,2111 \angle -12,5^\circ;$ $\dot{i}_{T24} = \dot{i}_{T29} = 1,3191 \angle -14,3^\circ;$ $\dot{i}_{T25} = \dot{i}_{T28} = 1,3191 \angle -14,3^\circ;$ $\dot{i}_{T26} = \dot{i}_{T27} = 1,3740 \angle -15,4^\circ.$
$\dot{U}_{ИПТ1}, \text{кВ}$	$\dot{U}_{ИПТ11} = 10,573 \angle -89,9^\circ;$ $\dot{U}_{ИПТ12} = 18,417 \angle -97,7^\circ;$ $\dot{U}_{ИПТ13} = 10,573 \angle -89,9^\circ.$	$\dot{U}_{ИПТ11} = 20,109 \angle 144,9^\circ;$ $\dot{U}_{ИПТ12} = 26,693 \angle 141,7^\circ;$ $\dot{U}_{ИПТ13} = 20,109 \angle 144,9^\circ.$	$\dot{U}_{ИПТ11} = 28,124 \angle 27,5^\circ;$ $\dot{U}_{ИПТ12} = 32,754 \angle 24,4^\circ;$ $\dot{U}_{ИПТ13} = 28,124 \angle 27,5^\circ.$

Таблица 3

Значения ЭДС  $\dot{E}_{T1}, \dot{E}_{T2n}$ , тока  $\dot{i}_{T2n}$  и напряжения  $\dot{U}_{ИПТ1}$  для троса Т2 протяженностью  $3 \times l_i$  с  $R_{ЗВПС} = 0,5 \text{ Ом}$  при однофазном КЗ фаз А, В, С и  $I_{КЗ} = 11,5 \text{ кА}$

–	КЗ фазы А	КЗ фазы В	КЗ фазы С
$\dot{E}_T, \text{кВ}$	$\dot{E}_{T1} = 20,549 \angle -104,0^\circ;$ $\dot{E}_{T2n} = 8,485 \angle -99,6^\circ.$	$\dot{E}_{T1} = 28,450 \angle 138,0^\circ;$ $\dot{E}_{T2n} = 7,048 \angle 140,7^\circ.$	$\dot{E}_{T1} = 33,815 \angle 21,8^\circ;$ $\dot{E}_{T2n} = 5,173 \angle 14,5^\circ.$
$\dot{i}_{T2n}, \text{кА}$	$\dot{i}_{T21} = \dot{i}_{T212} = 2,219 \angle -131,4^\circ;$ $\dot{i}_{T22} = \dot{i}_{T211} = 2,281 \angle -131,6^\circ;$ $\dot{i}_{T23} = \dot{i}_{T210} = 2,315 \angle -131,9^\circ;$ $\dot{i}_{T24} = \dot{i}_{T29} = 2,333 \angle -132,1^\circ;$ $\dot{i}_{T25} = \dot{i}_{T28} = 2,341 \angle -132,3^\circ;$	$\dot{i}_{T21} = \dot{i}_{T212} = 1,843 \angle 108,9^\circ;$ $\dot{i}_{T22} = \dot{i}_{T211} = 1,895 \angle 108,7^\circ;$ $\dot{i}_{T23} = \dot{i}_{T210} = 1,923 \angle 108,4^\circ;$ $\dot{i}_{T24} = \dot{i}_{T29} = 1,937 \angle 108,2^\circ;$ $\dot{i}_{T25} = \dot{i}_{T28} = 1,945 \angle 108,0^\circ;$	$\dot{i}_{T21} = \dot{i}_{T212} = 1,353 \angle -17,3^\circ;$ $\dot{i}_{T22} = \dot{i}_{T211} = 1,391 \angle -17,5^\circ;$ $\dot{i}_{T23} = \dot{i}_{T210} = 1,411 \angle -17,8^\circ;$ $\dot{i}_{T24} = \dot{i}_{T29} = 1,422 \angle -18,0^\circ;$ $\dot{i}_{T25} = \dot{i}_{T28} = 1,427 \angle -18,2^\circ;$
$\dot{i}_{T2n}, \text{кА}$	$\dot{i}_{T26} = \dot{i}_{T27} = 2,345 \angle -132,3^\circ.$	$\dot{i}_{T26} = \dot{i}_{T27} = 1,948 \angle 108,0^\circ.$	$\dot{i}_{T26} = \dot{i}_{T27} = 1,430 \angle -18,2^\circ.$
$\dot{U}_{ИПТ1}, \text{кВ}$	$\dot{U}_{ИПТ11} = 18,675 \angle -101,2^\circ;$ $\dot{U}_{ИПТ12} = 19,480 \angle -101,9^\circ;$ $\dot{U}_{ИПТ13} = 18,675 \angle -101,2^\circ.$	$\dot{U}_{ИПТ11} = 26,818 \angle 141,6^\circ;$ $\dot{U}_{ИПТ12} = 27,642 \angle 139,3^\circ;$ $\dot{U}_{ИПТ13} = 26,818 \angle 141,6^\circ.$	$\dot{U}_{ИПТ11} = 32,798 \angle 23,2^\circ;$ $\dot{U}_{ИПТ12} = 33,257 \angle 22,8^\circ;$ $\dot{U}_{ИПТ13} = 32,798 \angle 23,2^\circ.$

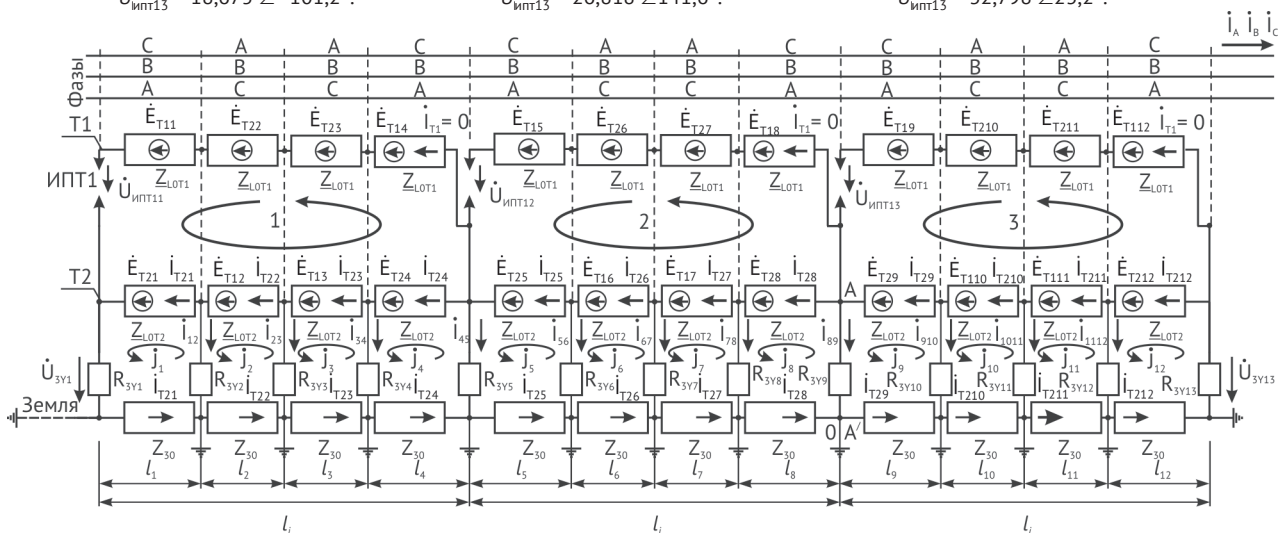


Рис. 4. ВЛ 750 кВ с транспозицией тросов и тросом Т2, заземленным в 13 местах участка протяженностью  $3 \times l_i$  при  $l_i = 10,43 \text{ км}$

ние наведенных в них ЭДС на участках 2–3, 6–7 и 10–11: трос Т1 в положении троса Т2 получает, соответственно, ЭДС  $\dot{E}_{T22}, \dot{E}_{T23}, \dot{E}_{T26}, \dot{E}_{T27}, \dot{E}_{T210}$  и  $\dot{E}_{T211}$ , а трос Т2 в положении троса Т1 — ЭДС  $\dot{E}_{T12}, \dot{E}_{T13}, \dot{E}_{T16}, \dot{E}_{T17}, \dot{E}_{T110}$  и  $\dot{E}_{T111}$ .

На рис. 4:

$$l_1 = 10,43 \text{ км}, l_1 = l_2 = l_3 = \dots = l_{10} = l_{11} = l_{12} = l_n = 2,6075 \text{ км};$$

$$Z_{\Lambda 0 T 2} = R_{0 \text{ ОКГТ}} + j \text{Im}[Z_{T 2 T 2 0}] = 1,116 + j 0,7547 \text{ Ом/км};$$

$$Z_{30} = \text{Re}[Z_{T 2 T 2 0}] = \text{Re}[Z_{T 1 T 1 0}] = 0,0457 \text{ Ом/км};$$

$$R_{3 Y 1} = R_{3 Y 2} = R_{3 Y 3} = R_{3 Y 4} = \dots = R_{3 Y 11} = R_{3 Y 12} = R_{3 Y 13} = R_{3 Y} = 10 \text{ Ом};$$

$$\dot{E}_{T 1 n} = \dot{E}_{T 1 1} = \dot{E}_{T 1 2} = \dots = \dot{E}_{T 1 11} = \dot{E}_{T 1 12} =$$

$$= \frac{1}{4} (\dot{E}_{\text{КТ1}}(0) - \dot{E}_{\text{ВТ1}}(0));$$

$$\dot{E}_{T 2 n} = \dot{E}_{T 2 1} = \dot{E}_{T 2 2} = \dots = \dot{E}_{T 2 11} =$$

$$= \dot{E}_{T 2 12} = \frac{1}{4} (\dot{E}_{\text{КТ2}}(0) + \dot{E}_{\text{ВТ2}}(0)).$$

Для контуров  $\dot{J}_1, \dot{J}_2, \dot{J}_3, \dots, \dot{J}_{10}, \dot{J}_{11}, \dot{J}_{12}$  (см. рис. 4) по методу контурных токов:

$$\left. \begin{aligned} \dot{J}_1 [(Z_{\Lambda 0 T 2} + Z_{30}) l_1 + 2R_{3Y}] - \dot{J}_2 R_{3Y} + \dot{J}_3 \cdot 0 + \dots + \dot{J}_{12} \cdot 0 &= \dot{E}_{T 2 1}; \\ -\dot{J}_1 R_{3Y} + \dot{J}_2 [(Z_{\Lambda 0 T 2} + Z_{30}) l_2 + 2R_{3Y}] - \dot{J}_3 R_{3Y} + \dot{J}_4 \cdot 0 + \dots + \dot{J}_{12} \cdot 0 &= \dot{E}_{T 2 2}; \\ \dot{J}_1 \cdot 0 - \dot{J}_2 R_{3Y} + \dot{J}_3 [(Z_{\Lambda 0 T 2} + Z_{30}) l_3 + 2R_{3Y}] - \dot{J}_4 R_{3Y} + \dot{J}_5 \cdot 0 + \dots + \dot{J}_{12} \cdot 0 &= \dot{E}_{T 2 3}; \\ \dot{J}_1 \cdot 0 + \dot{J}_2 \cdot 0 - \dot{J}_3 R_{3Y} + \dot{J}_4 [(Z_{\Lambda 0 T 2} + Z_{30}) l_4 + 2R_{3Y}] - \dot{J}_5 R_{3Y} + \dot{J}_6 \cdot 0 + \dots + \dot{J}_{12} \cdot 0 &= \dot{E}_{T 2 4}; \\ \dot{J}_1 \cdot 0 + \dots + \dot{J}_3 \cdot 0 - \dot{J}_4 R_{3Y} + \dot{J}_5 [(Z_{\Lambda 0 T 2} + Z_{30}) l_5 + 2R_{3Y}] - \dot{J}_6 R_{3Y} + \dot{J}_7 \cdot 0 + \dots + \dot{J}_{12} \cdot 0 &= \dot{E}_{T 2 5}; \\ \dot{J}_1 \cdot 0 + \dots + \dot{J}_4 \cdot 0 - \dot{J}_5 R_{3Y} + \dot{J}_6 [(Z_{\Lambda 0 T 2} + Z_{30}) l_6 + 2R_{3Y}] - \dot{J}_7 R_{3Y} + \dot{J}_8 \cdot 0 + \dots + \dot{J}_{12} \cdot 0 &= \dot{E}_{T 2 6}; \\ \dot{J}_1 \cdot 0 + \dots + \dot{J}_5 \cdot 0 - \dot{J}_6 R_{3Y} + \dot{J}_7 [(Z_{\Lambda 0 T 2} + Z_{30}) l_7 + 2R_{3Y}] - \dot{J}_8 R_{3Y} + \dot{J}_9 \cdot 0 + \dots + \dot{J}_{12} \cdot 0 &= \dot{E}_{T 2 7}; \\ \dot{J}_1 \cdot 0 + \dots + \dot{J}_6 \cdot 0 - \dot{J}_7 R_{3Y} + \dot{J}_8 [(Z_{\Lambda 0 T 2} + Z_{30}) l_8 + 2R_{3Y}] - \dot{J}_9 R_{3Y} + \dot{J}_{10} \cdot 0 + \dots + \dot{J}_{12} \cdot 0 &= \dot{E}_{T 2 8}; \\ \dot{J}_1 \cdot 0 + \dots + \dot{J}_7 \cdot 0 - \dot{J}_8 R_{3Y} + \dot{J}_9 [(Z_{\Lambda 0 T 2} + Z_{30}) l_9 + 2R_{3Y}] - \dot{J}_{10} R_{3Y} + \dot{J}_{11} \cdot 0 + \dot{J}_{12} \cdot 0 &= \dot{E}_{T 2 9}; \\ \dot{J}_1 \cdot 0 + \dots + \dot{J}_8 \cdot 0 - \dot{J}_9 R_{3Y} + \dot{J}_{10} [(Z_{\Lambda 0 T 2} + Z_{30}) l_{10} + 2R_{3Y}] - \dot{J}_{11} R_{3Y} + \dot{J}_{12} \cdot 0 &= \dot{E}_{T 2 10}; \\ \dot{J}_1 \cdot 0 + \dots + \dot{J}_9 \cdot 0 - \dot{J}_{10} R_{3Y} + \dot{J}_{11} [(Z_{\Lambda 0 T 2} + Z_{30}) l_{11} + 2R_{3Y}] - \dot{J}_{12} R_{3Y} &= \dot{E}_{T 2 11}; \\ \dot{J}_1 \cdot 0 + \dots + \dot{J}_{10} \cdot 0 - \dot{J}_{11} R_{3Y} + \dot{J}_{12} [(Z_{\Lambda 0 T 2} + Z_{30}) l_{12} + 2R_{3Y}] &= \dot{E}_{T 2 12}. \end{aligned} \right\} (6)$$

$$\dot{I}_{12} = \dot{J}_2 - \dot{J}_1; \dot{I}_{23} = \dot{J}_3 - \dot{J}_2; \dots \dot{I}_{1011} = \dot{J}_{11} - \dot{J}_{10}; \dot{I}_{1112} = \dot{J}_{12} - \dot{J}_{11}.$$

Каждый  $n$ -й из 12 элементов троса Т2 имеет сопротивление:

$$(Z_{\Lambda 0 T 2} + Z_{30}) l_n + 2R_{3Y} = 23,029 + j 1,968 \text{ Ом}.$$

Для напряжения на ИПТ11 можно записать (см. рис. 4):

$$\dot{U}_{\text{ИПТ11}} = \dot{E}_{T 1 1} + \dot{E}_{T 2 2} + \dot{E}_{T 2 3} + \dot{E}_{T 1 4} - \dot{E}_{T 2 1} - \dot{E}_{T 1 2} - \dot{E}_{T 1 3} - \dot{E}_{T 2 4} + Z_{\Lambda 0 T 2} l_1 (\dot{I}_{T 2 1} + \dot{I}_{T 2 2} + \dot{I}_{T 2 3} + \dot{I}_{T 2 4}).$$

Поскольку  $\dot{E}_{T 1 1} = \dot{E}_{T 1 2} = \dot{E}_{T 1 3} = \dot{E}_{T 1 4}$  и  $\dot{E}_{T 2 1} = \dot{E}_{T 2 2} = \dot{E}_{T 2 3} = \dot{E}_{T 2 4}$ , то последнее уравнение примет вид:

$$\dot{U}_{\text{ИПТ11}} = Z_{\Lambda 0 T 2} l_1 (\dot{I}_{T 2 1} + \dot{I}_{T 2 2} + \dot{I}_{T 2 3} + \dot{I}_{T 2 4}).$$

Проведя аналогичную операцию для напряжения  $\dot{U}_{\text{ИПТ12}}$  и  $\dot{U}_{\text{ИПТ13}}$ , получим:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{\text{ИПТ11}} &= Z_{\Lambda 0 T 2} l_1 (\dot{I}_{T 2 1} + \dot{I}_{T 2 2} + \dot{I}_{T 2 3} + \dot{I}_{T 2 4}); \\ \dot{U}_{\text{ИПТ12}} &= Z_{\Lambda 0 T 2} l_5 (\dot{I}_{T 2 5} + \dot{I}_{T 2 6} + \dot{I}_{T 2 7} + \dot{I}_{T 2 8}); \\ \dot{U}_{\text{ИПТ13}} &= Z_{\Lambda 0 T 2} l_9 (\dot{I}_{T 2 9} + \dot{I}_{T 2 10} + \dot{I}_{T 2 11} + \dot{I}_{T 2 12}). \end{aligned} \right\} (7)$$

Для тросов, установленных с транспозицией, в табл. 4 даны значения ЭДС  $\dot{E}_{T 1 n}, \dot{E}_{T 2 n}$ , тока  $\dot{I}_{T 2 n}$  и напряжения  $\dot{U}_{\text{ИПТ11}}$  для троса Т2 протяженностью  $3 \times l_p$ , заземленного в 13 местах с  $l_1 = 10,43$  км при однофазном КЗ фаз А, В и С и модуле тока КЗ 11,5 кА.

## 5.2. Тросы с транспозицией, сопротивления крайних ЗУ 0,5 Ом, а внутренних ЗУ 10 Ом

Трос Т2 по концам заземлен на  $R_{3Y \text{ ПС}} = 0,5$  Ом, а по трассе ВЛ — на  $R_{3Y} = 10$  Ом. Тогда в первом и последнем уравнениях системы (6) множители

$$\begin{aligned} [(Z_{\Lambda 0 T 2} + Z_{30}) l_1 + 2R_{3Y}] &= [(Z_{\Lambda 0 T 2} + Z_{30}) l_{12} + 2R_{3Y}] = \\ &= 23,029 + j 1,968 \text{ Ом} \end{aligned}$$

заменяются на

$$\begin{aligned} [(Z_{\Lambda 0 T 2} + Z_{30}) l_1 + R_{3Y \text{ ПС}} + R_{3Y}] &= [(Z_{\Lambda 0 T 2} + Z_{30}) l_{12} + \\ &+ R_{3Y \text{ ПС}} + R_{3Y}] = 13,529 + j 1,968 \end{aligned}$$

В табл. 5 даны значения  $\dot{E}_{T 1 n}, \dot{E}_{T 2 n}, \dot{I}_{T 2 n}$  и  $\dot{U}_{\text{ИПТ1}}$  для троса Т2.

## 6. Уменьшение значения напряжения на ИПТ1

В первой части статьи [1] было показано, что напряжение на ИПТ не должно превышать предельно допустимого уровня (ПДУ) 18 кВ [7]. В противном случае произойдет пробой искрового промежутка троса, что нежелательно как для изоляции троса, так и для персонала, проводящего работы на высоте под напряжением, для которого неожиданный пробой ИПТ является экстремальным стрессующим пси-

Таблица 4

Значения ЭДС  $\dot{E}_{T1n}$ ,  $\dot{E}_{T2n}$ , тока  $\dot{I}_{T2n}$  и напряжения  $\dot{U}_{ИПТ1}$  для троса Т2 протяженностью  $3 \times l_1$  при однофазном КЗ фаз А, В и С с модулем тока КЗ 11,5 кА и транспозиции тросов

-	КЗ фазы А	КЗ фазы В	КЗ фазы С
$\dot{E}_{Tn}$ , кВ	$\dot{E}_{T1n} = 5,173 \angle 104,0^\circ;$ $\dot{E}_{T2n} = 8,485 \angle 99,6^\circ.$	$\dot{E}_{T1n} = 7,113 \angle 138,0^\circ;$ $\dot{E}_{T2n} = 7,048 \angle 140,7^\circ.$	$\dot{E}_{T1n} = 8,454 \angle 21,8^\circ;$ $\dot{E}_{T2n} = 5,173 \angle 14,5^\circ.$
$\dot{I}_{T2n}$ , кА	$\dot{I}_{T21} = \dot{I}_{T212} = 0,879 \angle -121,1^\circ;$ $\dot{I}_{T22} = \dot{I}_{T211} = 1,242 \angle -127,5^\circ;$ $\dot{I}_{T23} = \dot{I}_{T210} = 1,517 \angle -129,7^\circ;$ $\dot{I}_{T24} = \dot{I}_{T29} = 1,790 \angle -128,7^\circ;$ $\dot{I}_{T25} = \dot{I}_{T28} = 1,865 \angle -129,9^\circ;$ $\dot{I}_{T26} = \dot{I}_{T27} = 1,774 \angle -133,0^\circ.$	$\dot{I}_{T21} = \dot{I}_{T212} = 0,884 \angle 118,4^\circ;$ $\dot{I}_{T22} = \dot{I}_{T211} = 1,387 \angle 114,5^\circ;$ $\dot{I}_{T23} = \dot{I}_{T21} = 1,661 \angle 112,1^\circ;$ $\dot{I}_{T24} = \dot{I}_{T29} = 1,801 \angle 110,7^\circ;$ $\dot{I}_{T25} = \dot{I}_{T28} = 1,876 \angle 109,6^\circ;$ $\dot{I}_{T26} = \dot{I}_{T27} = 1,916 \angle 108,7^\circ.$	$\dot{I}_{T21} = \dot{I}_{T212} = 0,8271 \angle -3,6^\circ;$ $\dot{I}_{T22} = \dot{I}_{T211} = 1,4130 \angle -3,6^\circ;$ $\dot{I}_{T23} = \dot{I}_{T210} = 1,6652 \angle -6,4^\circ;$ $\dot{I}_{T24} = \dot{I}_{T29} = 1,6846 \angle -11,3^\circ;$ $\dot{I}_{T25} = \dot{I}_{T28} = 1,7547 \angle -12,4^\circ;$ $\dot{I}_{T26} = \dot{I}_{T27} = 1,8969 \angle -10,0^\circ.$
$\dot{U}_{ИПТ1}$ , кВ	$\dot{U}_{ИПТ11} = 19,03 \angle -93,4^\circ;$ $\dot{U}_{ИПТ12} = 25,56 \angle -97,3^\circ;$ $\dot{U}_{ИПТ13} = 19,03 \angle -93,4^\circ.$	$\dot{U}_{ИПТ11} = 20,12 \angle 147,3^\circ;$ $\dot{U}_{ИПТ12} = 26,64 \angle 143,2^\circ;$ $\dot{U}_{ИПТ13} = 20,12 \angle 147,3^\circ.$	$\dot{U}_{ИПТ11} = 19,61 \angle 27,5^\circ;$ $\dot{U}_{ИПТ12} = 25,65 \angle 24,4^\circ;$ $\dot{U}_{ИПТ13} = 19,61 \angle 27,5^\circ.$

Таблица 5

Значения ЭДС  $\dot{E}_{T1n}$ ,  $\dot{E}_{T2n}$ , тока  $\dot{I}_{T2n}$  и  $\dot{U}_{ИПТ1}$  для троса Т2 с  $R_{3YPC} = 0,5$  Ом и  $R_{3Y} = 10$  Ом при однофазном КЗ фаз А, В и С с модулем тока КЗ 11,5 кА и транспозицией тросов

-	КЗ фазы А	КЗ фазы В	КЗ фазы С
$\dot{E}_{Tn}$ , кВ	$\dot{E}_{T1n} = 5,173 \angle -104,0^\circ;$ $\dot{E}_{T2n} = 8,485 \angle -99,6^\circ.$	$\dot{E}_{T1n} = 7,113 \angle 138,0^\circ;$ $\dot{E}_{T2n} = 7,048 \angle 140,7^\circ.$	$\dot{E}_{T1n} = 8,454 \angle 21,8^\circ;$ $\dot{E}_{T2n} = 5,173 \angle 14,5^\circ.$
$\dot{I}_{T2n}$ , кА	$\dot{I}_{T21} = \dot{I}_{T212} = 1,836 \angle -131,8^\circ;$ $\dot{I}_{T22} = \dot{I}_{T211} = 1,768 \angle -134,7^\circ;$ $\dot{I}_{T23} = \dot{I}_{T210} = 1,797 \angle -134,9^\circ;$ $\dot{I}_{T24} = \dot{I}_{T29} = 1,930 \angle -132,5^\circ;$ $\dot{I}_{T25} = \dot{I}_{T28} = 1,937 \angle -132,6^\circ;$ $\dot{I}_{T26} = \dot{I}_{T27} = 1,822 \angle -135,3^\circ.$	$\dot{I}_{T21} = \dot{I}_{T212} = 1,847 \angle 107,7^\circ;$ $\dot{I}_{T22} = \dot{I}_{T211} = 1,908 \angle 107,1^\circ;$ $\dot{I}_{T23} = \dot{I}_{T210} = 1,936 \angle 106,9^\circ;$ $\dot{I}_{T24} = \dot{I}_{T29} = 1,941 \angle 107,0^\circ;$ $\dot{I}_{T25} = \dot{I}_{T28} = 1,949 \angle 106,9^\circ;$ $\dot{I}_{T26} = \dot{I}_{T27} = 1,961 \angle 106,5^\circ.$	$\dot{I}_{T21} = \dot{I}_{T212} = 1,728 \angle -14,3^\circ;$ $\dot{I}_{T22} = \dot{I}_{T211} = 1,887 \angle -11,5^\circ;$ $\dot{I}_{T23} = \dot{I}_{T210} = 1,912 \angle -11,8^\circ;$ $\dot{I}_{T24} = \dot{I}_{T29} = 1,816 \angle -15,0^\circ;$ $\dot{I}_{T25} = \dot{I}_{T28} = 1,823 \angle -15,2^\circ;$ $\dot{I}_{T26} = \dot{I}_{T27} = 1,935 \angle -12,3^\circ.$
$\dot{U}_{ИПТ1}$ , кВ	$\dot{U}_{ИПТ11} = 25,75 \angle -99,4^\circ;$ $\dot{U}_{ИПТ12} = 26,40 \angle -99,8^\circ;$ $\dot{U}_{ИПТ13} = 25,75 \angle -99,4^\circ.$	$\dot{U}_{ИПТ11} = 26,81 \angle 141,3^\circ;$ $\dot{U}_{ИПТ12} = 27,47 \angle 140,8^\circ;$ $\dot{U}_{ИПТ13} = 26,81 \angle 141,3^\circ.$	$\dot{U}_{ИПТ11} = 25,79 \angle 21,0^\circ;$ $\dot{U}_{ИПТ12} = 26,40 \angle 20,4^\circ;$ $\dot{U}_{ИПТ13} = 25,79 \angle 21,0^\circ.$

хологическим воздействием. Поэтому значения напряжения  $U_{ИПТ1}$  необходимо уменьшить.

### 6.1. Тросы Т1 и Т2 установлены без транспозиции

Рассмотрим вариант установки тросов Т1 и Т2 без транспозиции с уменьшенной в два раза длиной участков заземленных на одном конце тросов Т1 (рис. 5).

Поскольку  $l_1 = 5,215$  км, то  $l_1 = l_2 = l_3 = \dots = l_{22} = l_{23} = l_{24} = l_n = 1,3038$  км.

Рассмотрим вариант с заземлением троса Т2 на концах линии на ЗУ РС  $R_{3YPC} = 0,5$  Ом, тогда на рис. 5

$$R_{3Y1} = R_{3Y25} = R_{3YPC} = 0,5 \text{ Ом}; R_{3Y2} = \dots = R_{3Y24} = R_{3Y} = 10 \text{ Ом};$$

$$Z_{\Lambda 0 T2} = R_{0 \text{ ОКГТ}} + j \text{Im}[Z_{T2 T20}] = 1,116 + j0,7547 \text{ Ом/км};$$

$$Z_{30} = \text{Re}[Z_{T2 T20}] = \text{Re}[Z_{T1 T10}] = 0,0457 \text{ Ом/км};$$

$$(Z_{\Lambda 0 T2} + Z_{30})l_n + 2R_{3Y} = 21,515 + j0,984 \text{ Ом};$$

$$(Z_{\Lambda 0 T2} + Z_{30})l_1 + R_{3Y} + R_{3YPC} = 12,015 + j0,984 \text{ Ом};$$

$$\dot{E}_{T1} = \dot{E}_{КТ1}(0) - \dot{E}_{ВТ1}(0);$$

$$\dot{E}_{T2n} = \dot{E}_{T21} = \dots = \dot{E}_{T224} = \frac{1}{4}(\dot{E}_{КТ2}(0) + \dot{E}_{ВТ2}(0)).$$

Поскольку расстояние  $l_1$  уменьшилось в два раза, значения ЭДС  $\dot{E}_{КТ1}(0)$ ,  $\dot{E}_{КТ2}(0)$  и  $\dot{E}_{ВТ1}(0) = \dot{E}_{ВТ2}(0)$  также уменьшаются в два раза, так как функции  $\dot{E}_{КТ1}(l)$ ,  $\dot{E}_{КТ2}(l)$  и  $\dot{E}_{ВТ1}(l) = \dot{E}_{ВТ2}(l)$  линейные. Учитывая, что  $R_{3Y1} = R_{3Y25} = R_{3YPC}$  для контуров  $\dot{J}_1, \dot{J}_2, \dot{J}_3, \dots, \dot{J}_{22}, \dot{J}_{23}, \dot{J}_{24}$  (см. рис. 5), по методу контурных токов запишем:





Для напряжения на ИПТ11–ИПТ16 контуров 1–6 получим:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{\text{ИПТ11}} &= \dot{E}_{T1} - \dot{E}_{T21} - \dot{E}_{T22} - \dot{E}_{T23} - \dot{E}_{T24} + \\ &+ \underline{Z}_{\Lambda 0 T2} l_1 (\dot{I}_{T21} + \dot{I}_{T22} + \dot{I}_{T23} + \dot{I}_{T24}); \\ \dot{U}_{\text{ИПТ12}} &= \dot{E}_{T1} - \dot{E}_{T25} - \dot{E}_{T26} - \dot{E}_{T27} - \dot{E}_{T28} + \\ &+ \underline{Z}_{\Lambda 0 T2} l_5 (\dot{I}_{T25} + \dot{I}_{T26} + \dot{I}_{T27} + \dot{I}_{T28}); \\ \dot{U}_{\text{ИПТ13}} &= \dot{E}_{T1} - \dot{E}_{T29} - \dot{E}_{T210} - \dot{E}_{T211} - \dot{E}_{T212} + \\ &+ \underline{Z}_{\Lambda 0 T2} l_9 (\dot{I}_{T29} + \dot{I}_{T210} + \dot{I}_{T211} + \dot{I}_{T212}); \\ \dot{U}_{\text{ИПТ14}} &= \dot{E}_{T1} - \dot{E}_{T213} - \dot{E}_{T214} - \dot{E}_{T215} - \dot{E}_{T216} + \\ &+ \underline{Z}_{\Lambda 0 T2} l_{13} (\dot{I}_{T213} + \dot{I}_{T214} + \dot{I}_{T215} + \dot{I}_{T216}); \\ \dot{U}_{\text{ИПТ15}} &= \dot{E}_{T1} - \dot{E}_{T217} - \dot{E}_{T218} - \dot{E}_{T219} - \dot{E}_{T220} + \\ &+ \underline{Z}_{\Lambda 0 T2} l_{17} (\dot{I}_{T217} + \dot{I}_{T218} + \dot{I}_{T219} + \dot{I}_{T220}); \\ \dot{U}_{\text{ИПТ16}} &= \dot{E}_{T1} - \dot{E}_{T221} - \dot{E}_{T222} - \dot{E}_{T223} - \dot{E}_{T224} + \\ &+ \underline{Z}_{\Lambda 0 T2} l_{21} (\dot{I}_{T221} + \dot{I}_{T222} + \dot{I}_{T223} + \dot{I}_{T224}); \end{aligned} \right\} (9)$$

Для тросов без транспозиции в табл. 6 даны значения ЭДС  $\dot{E}_{T1n}$ ,  $\dot{E}_{T2n}$ , тока  $\dot{I}_{T2n}$  и напряжения  $\dot{U}_{\text{ИПТ1}}$  для троса Т2 протяженностью  $6 \times l_1$ , заземленного в 25 местах с  $l_1 = 5,215$  км при однофазном КЗ фаз А, В и С и модуле тока КЗ 11,5 кА. В табл. 6  $\dot{U}_{\text{ИПТ11}} = \dot{U}_{\text{ИПТ16}}$ ,  $\dot{U}_{\text{ИПТ12}} = \dot{U}_{\text{ИПТ15}}$  и  $\dot{U}_{\text{ИПТ13}} = \dot{U}_{\text{ИПТ14}}$ .

## 6.2. Тросы Т1 и Т2 установлены с транспозицией

Рассмотрим вариант установки тросов Т1 и Т2 с транспозицией (рис. 6).

На рис. 6:

$$\dot{E}_{T1n} = \dot{E}_{T11} = \dots = \dot{E}_{T124} = \frac{1}{4} (\dot{E}_{\text{КТ1}}(0) - \dot{E}_{\text{ВТ1}}(0));$$

$$\dot{E}_{T2n} = \dot{E}_{T21} = \dots = \dot{E}_{T224} = \frac{1}{4} (\dot{E}_{\text{КТ2}}(0) + \dot{E}_{\text{ВТ2}}(0)).$$

На каждом втором и третьем шагах каждого цикла транспозиции тросы Т1 и Т2 меняются местами, что для наглядности схемы отмечено изменением чередования фаз линии снизу вверх с АВС на САВ. В результате изменения положения тросов происходит изменение наведенных в них ЭДС на участках 2–3, 6–7, 10–11, 14–15, 18–19 и 22–23: трос Т1 в положении троса Т2 получает, соответственно, ЭДС  $\dot{E}_{T22}, \dot{E}_{T23}, \dot{E}_{T26}, \dot{E}_{T27}, \dot{E}_{T210}, \dot{E}_{T211}, \dot{E}_{T214}, \dot{E}_{T215}, \dot{E}_{T218}, \dot{E}_{T219}$  и  $\dot{E}_{T222}, \dot{E}_{T223}$ , а трос Т2 в положении троса Т1 — ЭДС  $\dot{E}_{T12}, \dot{E}_{T13}, \dot{E}_{T16}, \dot{E}_{T17}, \dot{E}_{T110}, \dot{E}_{T111}, \dot{E}_{T114}, \dot{E}_{T115}, \dot{E}_{T118}, \dot{E}_{T119}$ , и  $\dot{E}_{T122}, \dot{E}_{T123}$ .

В рассматриваемом варианте, как и в предыдущем, расстояние  $l_1$  уменьшилось в два раза, поэтому значения ЭДС  $\dot{E}_{\text{КТ1}}(0)$ ,  $\dot{E}_{\text{КТ2}}(0)$  и  $\dot{E}_{\text{ВТ1}}(0) = \dot{E}_{\text{ВТ2}}(0)$  также уменьшаются в два раза, поскольку функции  $\dot{E}_{\text{КТ1}}(l)$ ,  $\dot{E}_{\text{КТ2}}(l)$  и  $\dot{E}_{\text{ВТ1}}(l) = \dot{E}_{\text{ВТ2}}(l)$  линейные.

Учитывая, что  $R_{3Y1} = R_{3Y25} = R_{3Y1С}$  для контуров  $\dot{J}_1, \dot{J}_2, \dot{J}_3, \dots, \dot{J}_{22}, \dot{J}_{23}, \dot{J}_{24}$  (см. рис. 6), по методу контурных токов запишем:

$$\left. \begin{aligned} \dot{J}_1 [(\underline{Z}_{\Lambda 0 T2} + Z_{30}) l_1 + R_{3Y} + R_{3Y1С}] - \dot{J}_2 R_{3Y} + \dot{J}_3 \cdot 0 + \dots + \dot{J}_{24} \cdot 0 &= \dot{E}_{T21}; \\ -\dot{J}_1 R_{3Y} + \dot{J}_2 [(\underline{Z}_{\Lambda 0 T2} + Z_{30}) l_2 + 2R_{3Y}] - \dot{J}_3 R_{3Y} + \dot{J}_4 \cdot 0 + \dots + \dot{J}_{24} \cdot 0 &= \dot{E}_{T12}; \\ \dot{J}_1 \cdot 0 - \dot{J}_2 R_{3Y} + \dot{J}_3 [(\underline{Z}_{\Lambda 0 T2} + Z_{30}) l_3 + 2R_{3Y}] - \dot{J}_4 R_{3Y} + \dot{J}_5 \cdot 0 + \dots + \dot{J}_{24} \cdot 0 &= \dot{E}_{T13}; \\ \dot{J}_1 \cdot 0 + \dot{J}_2 \cdot 0 - \dot{J}_3 R_{3Y} + \dot{J}_4 [(\underline{Z}_{\Lambda 0 T2} + Z_{30}) l_4 + 2R_{3Y}] - \dot{J}_5 R_{3Y} + \dot{J}_6 \cdot 0 + \dots + \dot{J}_{24} \cdot 0 &= \dot{E}_{T24}; \\ \dot{J}_1 \cdot 0 + \dots + \dot{J}_3 \cdot 0 - \dot{J}_4 R_{3Y} + \dot{J}_5 [(\underline{Z}_{\Lambda 0 T2} + Z_{30}) l_5 + 2R_{3Y}] - \dot{J}_6 R_{3Y} + \dot{J}_7 \cdot 0 + \dots + \dot{J}_{24} \cdot 0 &= \dot{E}_{T25}; \\ \dot{J}_1 \cdot 0 + \dots + \dot{J}_4 \cdot 0 - \dot{J}_5 R_{3Y} + \dot{J}_6 [(\underline{Z}_{\Lambda 0 T2} + Z_{30}) l_6 + 2R_{3Y}] - \dot{J}_7 R_{3Y} + \dot{J}_8 \cdot 0 + \dots + \dot{J}_{24} \cdot 0 &= \dot{E}_{T16}; \\ \dots & \\ \dot{J}_1 \cdot 0 + \dots + \dot{J}_{17} \cdot 0 - \dot{J}_{18} R_{3Y} + \dot{J}_{19} [(\underline{Z}_{\Lambda 0 T2} + Z_{30}) l_7 + 2R_{3Y}] - \dot{J}_{20} R_{3Y} + \dot{J}_{21} \cdot 0 + \dots + \dot{J}_{24} \cdot 0 &= \dot{E}_{T119}; \\ \dot{J}_1 \cdot 0 + \dots + \dot{J}_{18} \cdot 0 - \dot{J}_{19} R_{3Y} + \dot{J}_{20} [(\underline{Z}_{\Lambda 0 T2} + Z_{30}) l_8 + 2R_{3Y}] - \dot{J}_{21} R_{3Y} + \dot{J}_{22} \cdot 0 + \dots + \dot{J}_{24} \cdot 0 &= \dot{E}_{T220}; \\ \dot{J}_1 \cdot 0 + \dots + \dot{J}_{19} \cdot 0 - \dot{J}_{20} R_{3Y} + \dot{J}_{21} [(\underline{Z}_{\Lambda 0 T2} + Z_{30}) l_9 + 2R_{3Y}] - \dot{J}_{22} R_{3Y} + \dot{J}_{23} \cdot 0 + \dot{J}_{24} \cdot 0 &= \dot{E}_{T221}; \\ \dot{J}_1 \cdot 0 + \dots + \dot{J}_{20} \cdot 0 - \dot{J}_{21} R_{3Y} + \dot{J}_{22} [(\underline{Z}_{\Lambda 0 T2} + Z_{30}) l_{10} + 2R_{3Y}] - \dot{J}_{23} R_{3Y} + \dot{J}_{24} \cdot 0 &= \dot{E}_{T122}; \\ \dot{J}_1 \cdot 0 + \dots + \dot{J}_{21} \cdot 0 - \dot{J}_{22} R_{3Y} + \dot{J}_{23} [(\underline{Z}_{\Lambda 0 T2} + Z_{30}) l_{11} + 2R_{3Y}] - \dot{J}_{24} R_{3Y} &= \dot{E}_{T123}; \\ \dot{J}_1 \cdot 0 + \dots + \dot{J}_{22} \cdot 0 - \dot{J}_{23} R_{3Y} + \dot{J}_{24} [(\underline{Z}_{\Lambda 0 T2} + Z_{30}) l_{12} + R_{3Y} + R_{3Y1С}] &= \dot{E}_{T224}. \end{aligned} \right\} (10)$$

$$\dot{I}_{12} = \dot{J}_2 - \dot{J}_1; \dot{I}_{23} = \dot{J}_3 - \dot{J}_2; \dots; \dot{I}_{2223} = \dot{J}_{23} - \dot{J}_{22}; \dot{I}_{2324} = \dot{J}_{24} - \dot{J}_{23}.$$

Значения ЭДС  $\dot{E}_{T1n}$ ,  $\dot{E}_{T2n}$ , тока  $\dot{i}_{T2n}$  и напряжения  $\dot{U}_{инт1}$  для троса Т2 протяженностью  $6 \times l_i$  при однофазном КЗ фаз А, В и С без транспозиции тросов

	КЗ фазы А	КЗ фазы В	КЗ фазы С
$\dot{E}_{Tn}$ , кВ,	$\dot{E}_{T1} = 10,275 \angle -104,0^\circ;$ $\dot{E}_{T2n} = 4,242 \angle -99,6^\circ.$	$\dot{E}_{T1} = 14,343 \angle 139,0^\circ;$ $\dot{E}_{T2n} = 3,493 \angle 139,7^\circ.$	$\dot{E}_{T1} = 16,907 \angle 21,8^\circ;$ $\dot{E}_{T2n} = 2,587 \angle 14,5^\circ.$
$\dot{i}_{T2n}$ , кА	$\dot{i}_{T21} = \dot{i}_{T224} = 2,153 \angle -130,8^\circ;$ ..... $\dot{i}_{T26} = \dot{i}_{T219} = 2,332 \angle -132,1^\circ;$ ..... $\dot{i}_{T212} = \dot{i}_{T213} = 2,349 \angle -132,5^\circ.$	$\dot{i}_{T21} = \dot{i}_{T224} = 1,781 \angle 107,1^\circ;$ ..... $\dot{i}_{T26} = \dot{i}_{T219} = 1,929 \angle 105,9^\circ;$ ..... $\dot{i}_{T212} = \dot{i}_{T213} = 1,943 \angle 105,5^\circ.$	$\dot{i}_{T21} = \dot{i}_{T224} = 1,313 \angle -16,7^\circ;$ ..... $\dot{i}_{T26} = \dot{i}_{T219} = 1,422 \angle -17,9^\circ;$ ..... $\dot{i}_{T212} = \dot{i}_{T213} = 1,432 \angle -18,4^\circ.$
$\dot{U}_{инт1}$ , кВ	$\dot{U}_{инт11} = 8,980 \angle -100,4^\circ;$ $\dot{U}_{инт12} = 9,670 \angle -101,7^\circ;$ $\dot{U}_{инт13} = 9,775 \angle -102,2^\circ.$	$\dot{U}_{инт11} = 13,131 \angle 137,9^\circ;$ $\dot{U}_{инт12} = 13,701 \angle 137,1^\circ;$ $\dot{U}_{инт13} = 13,787 \angle 136,8^\circ.$	$\dot{U}_{инт11} = 16,202 \angle 23,6^\circ;$ $\dot{U}_{инт12} = 16,595 \angle 22,9^\circ;$ $\dot{U}_{инт13} = 16,649 \angle 22,7^\circ.$

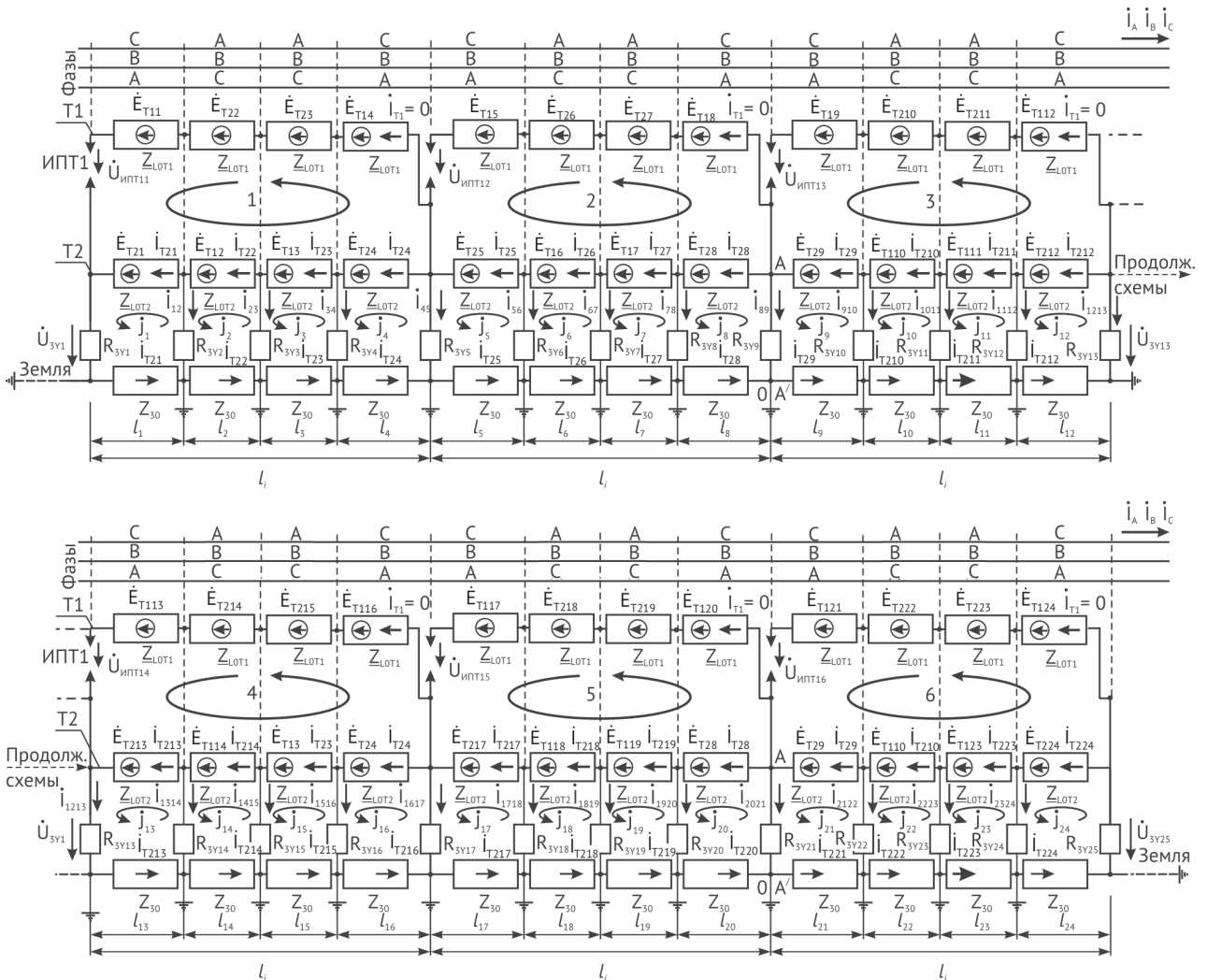


Рис. 6. ВЛ 750 кВ с транспозицией тросов, с тросом Т2, заземленным в 25 местах участка протяженностью  $6 \times l_i$  при  $l_i = 5,215$  км

Аналогично выражению (7) для напряжения на ИППТ1  $\dot{U}_{ИППТ11}$ – $\dot{U}_{ИППТ16}$  контуров 1–6 можно записать:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{ИППТ11} &= \underline{Z}_{\Lambda 0 T 2} l_1 (\dot{I}_{T 21} + \dot{I}_{T 22} + \dot{I}_{T 23} + \dot{I}_{T 24}); \\ \dot{U}_{ИППТ12} &= \underline{Z}_{\Lambda 0 T 2} l_5 (\dot{I}_{T 25} + \dot{I}_{T 26} + \dot{I}_{T 27} + \dot{I}_{T 28}); \\ \dot{U}_{ИППТ13} &= \underline{Z}_{\Lambda 0 T 2} l_9 (\dot{I}_{T 29} + \dot{I}_{T 210} + \dot{I}_{T 211} + \dot{I}_{T 212}); \\ \dot{U}_{ИППТ14} &= \underline{Z}_{\Lambda 0 T 2} l_{13} (\dot{I}_{T 213} + \dot{I}_{T 214} + \dot{I}_{T 215} + \dot{I}_{T 216}); \\ \dot{U}_{ИППТ15} &= \underline{Z}_{\Lambda 0 T 2} l_{17} (\dot{I}_{T 217} + \dot{I}_{T 218} + \dot{I}_{T 219} + \dot{I}_{T 220}); \\ \dot{U}_{ИППТ16} &= \underline{Z}_{\Lambda 0 T 2} l_{21} (\dot{I}_{T 221} + \dot{I}_{T 222} + \dot{I}_{T 223} + \dot{I}_{T 224}). \end{aligned} \right\} (11)$$

Для тросов с транспозицией в табл. 7 даны значения ЭДС  $\dot{E}_{T1n}$ ,  $\dot{E}_{T2n}$ , тока  $\dot{I}_{T2n}$  и напряжения  $\dot{U}_{ИППТ1}$  для троса Т2 протяженностью  $6 \times l_p$ , заземленного в 25 местах с  $l_i = 5,215$  км при однофазном КЗ фаз А, В и С и модуле тока КЗ 11,5 кА. В табл. 7  $\dot{U}_{ИППТ11} = \dot{U}_{ИППТ16}$ ,  $\dot{U}_{ИППТ12} = \dot{U}_{ИППТ15}$  и  $\dot{U}_{ИППТ13} = \dot{U}_{ИППТ14}$ .

### 6.3. Заключение по уменьшению протяженности участков троса Т2 в два раза

В табл. 8 даны сводные результаты расчета напряжения  $\dot{U}_{ИППТ1}$  при однофазных КЗ фаз А, В и С для установки тросов Т1 и Т2 без транспозиции и

с транспозицией при уменьшении протяженности участков тросов Т1 и Т2 в два раза.

Для всех рассмотренных вариантов напряжение  $\dot{U}_{ИППТ1}$  не превышает ПДУ 18 кВ.

### 7. Влияние места КЗ на величину токов в тросе Т2

Протяженность рассматриваемой ВЛ 750 кВ составляет 472 км, и при ее питании только с левой стороны, со стороны ПС1, ток КЗ (на примере фазы А) без учета внутреннего сопротивления системы достигает значения 11,5 кА на расстоянии 127 км от источника питания (рис. 7).

На остальных 345 км фазы А линии тока нет, значит, ЭДС от тока КЗ фазы А в тросах Т1 и Т2 на этом участке не наводится. Если ВЛ 750 кВ на всем протяжении имеет  $N$  опор с длиной пролета, допустим,  $l_{пр} = 500$  м, то на правом конце линии ПС2 контуры троса Т2 без наведенных ЭДС представляют собой последовательность пассивных двухполюсников, показанную на рис. 8.

Если сопротивление ЗУ троса Т2 имеют значения  $R_{ЗУН} = R_{ЗУПС} = 0,5$  Ом,  $R_{ЗУН-1} = R_{ЗУН-2} = \dots = R_{ЗУН-k} = 10$  Ом, удельное сопротивление троса Т2 и земли —  $\underline{Z}_{\Lambda 0 T 2} = 1,116 + j0,7547$  Ом/км и  $Z_{30} = 0,0457$  Ом/к, то при дли-

Таблица 7

Значения ЭДС  $\dot{E}_{T1n}$ ,  $\dot{E}_{T2n}$ , тока  $\dot{I}_{T2n}$  и напряжения  $\dot{U}_{ИППТ1}$  для троса Т2 протяженностью  $6 \times l_i$  при однофазном КЗ фаз А, В и С с транспозицией тросов

-	КЗ фазы А	КЗ фазы В	КЗ фазы С
$\dot{E}_{Tn}$ , кВ	$\dot{E}_{T1n} = 2,569 \angle -104,0^\circ$ ; $\dot{E}_{T2n} = 4,242 \angle -99,6^\circ$ .	$\dot{E}_{T1n} = 3,586 \angle 139,0^\circ$ ; $\dot{E}_{T2n} = 3,493 \angle 139,7^\circ$ .	$\dot{E}_{T1n} = 4,227 \angle 21,8^\circ$ ; $\dot{E}_{T2n} = 2,587 \angle 14,5^\circ$ .
$\dot{I}_{T2n}$ , кА	$\dot{I}_{T21} = \dot{I}_{T224} = 1,755 \angle -131,8^\circ$ ; $\dot{I}_{T26} = \dot{I}_{T219} = 1,839 \angle -134,5^\circ$ ; $\dot{I}_{T212} = \dot{I}_{T213} = 1,915 \angle -133,4^\circ$ .	$\dot{I}_{T21} = \dot{I}_{T224} = 1,794 \angle 108,1^\circ$ ; $\dot{I}_{T26} = \dot{I}_{T219} = 1,948 \angle 106,9^\circ$ ; $\dot{I}_{T212} = \dot{I}_{T213} = 1,957 \angle 106,4^\circ$ .	$\dot{I}_{T21} = \dot{I}_{T224} = 1,700 \angle -13,1^\circ$ ; $\dot{I}_{T26} = \dot{I}_{T219} = 1,898 \angle -12,6^\circ$ ; $\dot{I}_{T212} = \dot{I}_{T213} = 1,855 \angle -14,7^\circ$ .
$\dot{U}_{ИППТ1}$ , кВ	$\dot{U}_{ИППТ11} = 14,351 \angle -99,0^\circ$ ; $\dot{U}_{ИППТ12} = 13,149 \angle -99,7^\circ$ ; $\dot{U}_{ИППТ13} = 13,232 \angle -100,0^\circ$ .	$\dot{U}_{ИППТ11} = 13,113 \angle 141,8^\circ$ ; $\dot{U}_{ИППТ12} = 13,679 \angle 140,9^\circ$ ; $\dot{U}_{ИППТ13} = 13,762 \angle 140,5^\circ$ .	$\dot{U}_{ИППТ11} = 12,613 \angle 21,5^\circ$ ; $\dot{U}_{ИППТ12} = 13,146 \angle 20,6^\circ$ ; $\dot{U}_{ИППТ13} = 13,223 \angle 20,3^\circ$ .

Таблица 8

Сводные результаты расчета напряжения  $\dot{U}_{ИППТ1}$  при однофазных КЗ и  $l_i = 5,215$  км

Транспозиция	КЗ фазы	$\dot{U}_{ИППТ11} = \dot{U}_{ИППТ16}$ , кВ	$\dot{U}_{ИППТ12} = \dot{U}_{ИППТ15}$ , кВ	$\dot{U}_{ИППТ13} = \dot{U}_{ИППТ14}$ , кВ
Нет	А	8,980 $\angle -100,4^\circ$	9,670 $\angle -101,7^\circ$	9,775 $\angle -102,2^\circ$
	В	13,131 $\angle 137,9^\circ$	13,701 $\angle 137,1^\circ$	13,787 $\angle 136,8^\circ$
	С	16,202 $\angle 23,6^\circ$	16,595 $\angle 22,9^\circ$	16,649 $\angle 22,7^\circ$
Есть	А	14,351 $\angle -99,0^\circ$	13,149 $\angle -99,7^\circ$	13,232 $\angle -100,0^\circ$
	В	13,113 $\angle 141,8^\circ$	13,679 $\angle 140,9^\circ$	13,762 $\angle 140,5^\circ$
	С	12,613 $\angle 21,5^\circ$	13,146 $\angle 20,6^\circ$	13,223 $\angle 20,3^\circ$

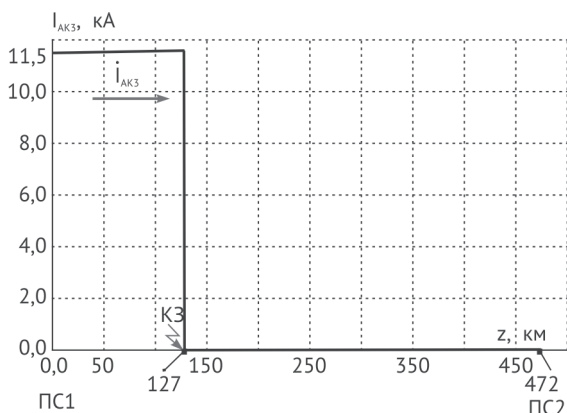


Рис. 7. Распределение тока КЗ фазы А при питании ВЛ 750 кВ только со стороны ПС1 и КЗ на расстоянии 127 км от источника питания

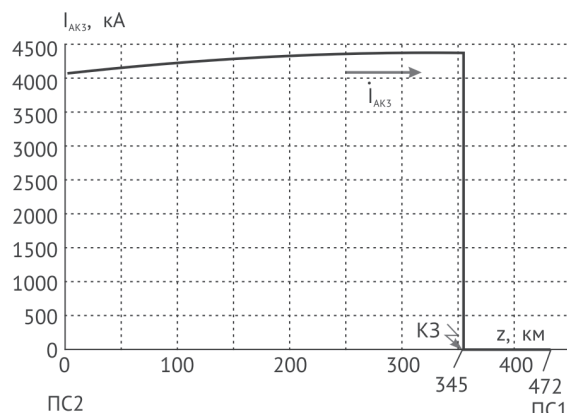


Рис. 9. Распределение тока КЗ фазы А без учета внутреннего сопротивления системы при питании ВЛ 750 кВ только со стороны ПС2 и КЗ на расстоянии 127 км от ПС1 или 345 км от источника питания

не пролета  $l_{пр} = 500$  м модуль входного сопротивления  $Z_N$  двухполюсника  $N$  будет иметь значение  $|Z_N| = 1,033$  Ом.

По мере сворачивания пассивных двухполюсников и приближения к крайнему правому, содержащему ЭДС контуру троса Т2, модуль результирующего сопротивления  $|Z_{N-k}|$  увеличивается, превышая значение  $R_{ЗУПС} = 0,5$  Ом, принятое в расчетах, что приведет к снижению величины тока в цепи троса Т2.

При питании ВЛ 750 кВ протяженностью 472 км только со стороны ПС2 и КЗ на расстоянии 127 км от ПС1 или 345 км от источника питания ПС2 ток КЗ фазы А не превышает 4,5 кА (рис. 9).

Поскольку ток КЗ фазы А не превышает 4,5 кА, т.е. более чем в 2,6 раза меньше тока КЗ 11,5 кА предыдущего варианта, то это приведет к уменьшению наведенных в тросах Т1 и Т2 ЭДС, значит, и токов в контурах троса Т2 и напряжения на искровых промежутках троса Т1 не менее чем в 2,6 раза.

При питании ВЛ 750 кВ, как со стороны ПС1, так и со стороны ПС2, токи КЗ фазы А будут соответствовать представленным как на рис. 7, так и на рис. 9, только направления этих токов будут встречными.

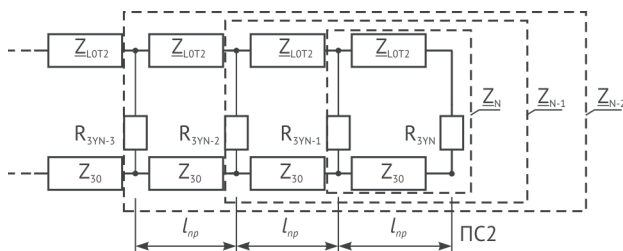


Рис. 8. Контур троса Т2 без наведенных ЭДС на правом конце ВЛ 750 кВ

Тогда направления ЭДС, наведенных этими токами на участках 127 и 345 км, также будут встречными. Если ЭДС при определении напряжения  $\dot{U}_{ИПТ1}$  имеют локальное влияние (на каждом участке троса Т1 соответствующие его положению ЭДС), то результирующие токи объединенных по всей длине контуров троса Т2 будут меньше токов, рассмотренных выше.

### 8. Изменение тока в тросе Т2 при увеличении его протяженности

Остался открытым вопрос изменения тока в тросе Т2, на который действует ток КЗ с модулем 11,5 кА, при увеличении его протяженности. Для решения этого вопроса рассмотрим вариант питания ВЛ 750 кВ со стороны ПС1, принимая действие тока КЗ 11,5 кА на расстоянии 130 км от источника питания. Длину заземленного на концах участка троса Т2 выбираем равной  $l = 10$  км. Влиянию тока КЗ 11,5 кА подвержено 13 участков троса Т2, на остальные участки этого троса общей протяженностью 342 км ток КЗ не оказывает действия ввиду его отсутствия. Сопротивление первого и последнего ЗУ троса Т2 равно сопротивлению ЗУ ПС 0,5 Ом, сопротивление остальных ЗУ 10 Ом.  $Z_{ЛОТ2} = 1,116 + j0,7547$  Ом/км;  $Z_{30} = 0,0457$  Ом/км.

Сворачивание по участкам сопротивлений пассивных двухполюсников троса Т2 проведем по методу, схема которого представлена на рис. 8. После пятого сворачивания в третьих знаках после запятой изменение величин сопротивления  $Z_{N-1} = 6,758 + j0,970$  Ом прекращается. Тогда в системе из 13 уравнений:

для 1-го уравнения

$$(Z_{ЛОТ2} + Z_{30})l + R_{ЗУ} + R_{ЗУПС} = 22,117 + j7,547 \text{ Ом};$$

для 2–12 уравнений

$$(\underline{Z}_{\Delta 0T2} + Z_{30})l + 2R_{3Y} = 31,617 + j7,547 \text{ Ом};$$

для 13-го уравнения

$$(\underline{Z}_{\Delta 0T2} + Z_{30})l + R_{3Y} + \underline{Z}_{N-i} = 28,385 + j8,517 \text{ Ом}.$$

Величину токов в тресе Т2 определим на примере КЗ фазы А без транспозиции тросов (наибольшие значения токов), для которой ЭДС  $\dot{E}_{T1}$  и  $\dot{E}_{T2}$  в пересчете с  $l_1 = 10,43$  км на  $l = 10$  км составят

$$\dot{E}_{T1} = 19,701 \angle -104,0^\circ \text{ кВ}, \dot{E}_{T2} = 32,541 \angle -99,6^\circ \text{ кВ}.$$

Решая систему уравнений, для КЗ фазы А получим токи в тресе Т2, модули которых изменяются на участках 1–11 в пределах от 2,297 до 2,349 кА при аргументе  $(-131^\circ) - (-133^\circ)$ , и только на 12-м и 13-ом участках токи равны 2,175  $\angle -130,0^\circ$  кА и 1,770  $\angle -128,4^\circ$  кА, соответственно, что объясняется высоким значением величины сопротивления  $\underline{Z}_{N-i} = 6,758 + j0,970$  Ом на конце участка протяженностью 130 км троса Т2 по сравнению с  $R_{3YTC} = 0,5$  Ом.

Следует отметить, что, если принять шаг заземления троса Т2 на участке 342 км равным не 10 км, как рассмотрено выше, а 0,5 км, то после 15-го сворачивания в третьих знаках после запятой изменение величин сопротивления  $\underline{Z}_{N-i}$  прекращается, но его значение становится равным  $\underline{Z}_{N-i} = 2,248 + j0,578$  Ом. Тогда для 13-го уравнения:

$$(\underline{Z}_{\Delta 0T2} + Z_{30})l + R_{3Y} + \underline{Z}_{N-i} = 23,865 + j8,125 \text{ Ом}.$$

Решая систему уравнений, для КЗ фазы А получим токи в тресе Т2, модули которых изменяются на участках 1–11 в пределах от 2,297 до 2,349 кА при аргументе  $(-132^\circ) - (-133^\circ)$ , а на 12-м и 13-м участках токи равны 2,276  $\angle -131,7^\circ$  кА и 2,111  $\angle -131,5^\circ$  кА, соответственно.

Сравнивая полученные результаты с результатами расчета для КЗ фазы А токов в тресе Т2 протяженностью  $3 \times 10,43 = 31,29$  км с 13 ЗУ для режима «без транспозиции», полученные в разделе 4.2, табл. 3, где

токи на участках 1–12 изменяются в пределах от 2,219 до 2,345 кА при аргументе  $(-131^\circ) - (-132^\circ)$ , отмечаем их хорошее совпадение. Это позволяет сделать вывод, что увеличение длины заземленного троса Т2 с 31,29 км и 13 ЗУ до 130 км и 14 ЗУ не приводит к увеличению тока в тресе Т2.

Далее, проводя сравнение результатов расчета для того же троса Т2, но протяженностью  $6 \times 5,215 = 31,29$  км с 25 ЗУ в режиме «без транспозиции», полученные в разделе 6.1, табл. 6, где токи на участках 1–24 при КЗ фазы А изменяются в пределах от 2,153 до 2,349 кА при аргументе  $(-131^\circ) - (-132,5^\circ)$ , можно сделать вывод, что уменьшение в 2 раза длины заземленных по концам участков троса Т2 и увеличение в 2 раза числа ЗУ этого троса не привело к изменению значений тока в тресе Т2.

Таким образом, протяженность заземленных на концах участков троса Т2 и число установленных на тресе ЗУ практически не влияет на величину протекающих в этом тресе токов, создаваемых в нем магнитным полем токов однофазных КЗ рассмотренной ВЛ 750 кВ.

## 9. Заключение

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. При однофазном коротком замыкании пробой искрового промежутка грозозащитного троса в результате наведения на нем высокого напряжения опасен для персонала, проводящего работы на высоте под напряжением, поскольку является для него экстремальным стрессирующим психологическим воздействием. Поэтому при известном наибольшем значении тока КЗ длину участка заземленного на одном конце ГТ следует выбирать по вышеизложенной методике. Адекватный выбор наведенного на ГТ напряжения позволит обеспечить безопасность персонала при проведении работ под напряжением.

## Литература

1. Токарский А.Ю., Рубцова Н.Б., Рябченко В.Н. Напряжения на грозозащитном тресе воздушной линии электропередачи, как фактор риска. Часть 1 // Безопасность в техносфере. — 2016. — №1. с. 28–40.
2. Костенко М.В., Перельман Л.С., Шкарин Ю.П. Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях высокого напряжения. — М.: Энергия, 1973. 272 с.
3. Цицикян Г.Н. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике. — СПб.: Элмор, 2007. — 184 с.
4. Мисриханов М.Ш., Токарский А.Ю. Учет проводимости земли при определении ЭДС, наведенных в параллельных воздушных линиях электропередачи // ЭЛЕКТРО, 2010, № 3, с.13–18.

5. Мисриханов М.Ш., Токарский А.Ю. Определение ЭДС, наведенных в параллельных воздушных линиях электропередачи, с учетом проводимости земли // Новое в Российской электроэнергетике, № 7, июль 2010 г., «Энерго-пресс», с.29–40.
6. 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.
7. Зеличенко А.С., Смирнов Б.И. Проектирование механической части воздушных линий сверхвысокого напряжения. М.: Энергоиздат, 1981, 336 с.

#### References:

1. Tokarskiy A.Yu, Rubtsova N.B., Ryabchenko V.N. Napryazheniya na grozozashchitnom trose vozduшной линии электропередачи, kak faktor riska [Voltages Induced in Overhead Ground-Wire Cable as Risk Factor. Part 1]. *Bezopasnost' v tekhnosfere* [Safety in technosphere]. 2016, V. 5, I. 1, pp. 28–40. DOI: 10.12737/19021 (in Russian)
2. Kostenko M.V., Perelman L.S., Shkarin Yu.P. *Volnovye protsessy i elektricheskie pomekhi v mnogoprovodnykh liniyakh vysokogo napryazheniya* [Wave processes and electrical interference in multi-wire high voltage lines]. Moscow, Energiya Publ., 1973. 272 p. (in Russian)
3. Tsitsikjan G.N. *Elektromagnitnaya sovmestimost' v elektroenergetike* [Electromagnetic compatibility in electric power industry]. St. Petersburg, ELMOR Publ., 2007. 184 p. (in Russian)
4. Misrikhanov M.Sh., Tokarskiy A.Yu. Uchet provodimosti zemli pri opredelenii EDS, navedennykh v parallelnykh vozduzhnykh liniyakh elektroperedachi [Accounting for ground conductivity under voltage induced in the parallel overhead transmission lines determining]. *ELEKTRO* [ELEKTRO]. 2010, I. 3, pp. 13–18. (in Russian)
5. Misrikhanov M.Sh., Tokarskiy A.Yu. Opredelenie EDS, navedennykh v parallel'nykh vozduzhnykh liniyakh elektroperedachi, s uchetom provodimosti zemli [Determination of voltages induced in overhead transmission lines with ground conductivity consideration]. *Novoe v Rossijskoj jelektroenergetike* [News in Russian electric power industry]. 2010, I. 7, Energo-press Publ., pp. 29–40. (in Russian)
6. RD 34.20.504-94. *Tipovaya instruksiya po ekspluatatsii vozduzhnykh liniy elektroperedachi napryazheniem 35-800 kV. RAO energetiki i elektrifikatsii «EES Rossii»* [GD 34.20.504-94. Standard instruction manual for 35-800 kV overhead transmission lines maintenance. Russian joint stock company of power and electrification “UES of Russia”]. Power network Department Publ., 1996. 126 p. (in Russian)
7. Zelichenko A.S., Smirnov B.I. *Proektirovanie mekhanicheskoy chasti vozduzhnykh liniy sverkhvysokogo napryazheniya* [Mechanical design of extremely high voltage overhead transmission lines]. Moscow, Energoizdat Publ., 1981. 336 p. (in Russian)

---

## Voltages Induced in Overhead Ground-Wire Cable as Risk Factor. Part 2

**A.Yu. Tokarsky**, Doctor of Engineering, Associate Professor, Team Manager, Leading Expert, FSBSI “Scientific Research Institute of Occupational Health”, Moscow, Russia, JSC Research & Development Center for Power Engineering, Moscow, Russia

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

**V.N. Ryabchenko**, Doctor of Engineering, Professor, Chief Technologist of Automatic Control System6 JSC Research & Development Center for Power Engineering, Moscow, Russia

*To ensure the personnel safety during live working on overhead transmission line (OTL), as well as lightning protection cables' (LPC) isolation integrity maintaining, by the example of three-phase 750 kV OTL has been presented an algorithm for calculation of voltages, electro-moving forces and currents induced by single phase short-circuit currents' magnetic field of OTL in LPC1 grounded in one point, and in LPC 2 (with fiber-optic communication line function) grounded at every tower. For single-phase short circuit modes has been presented an algorithm for length selection of grounded on one end LPC1 part on the condition of compliance with the maximum permissible voltage level on a spark gap which bypasses an insulator set of LPC1.*

**Keywords:** three-phase overhead transmission line, lightning protection cables, fiber-optic communication line, single-phased short circuit, electric safety.