

# Распределение напряжения вдоль отключенной и заземленной линии, наведенного электрическим полем параллельной линии

**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>

<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:

однопроводная линия электропередачи, электрическое поле, частичные емкости, собственные и взаимные сопротивления, наведенные напряжения и токи, распределение напряжения вдоль линии, безопасность работы, электрические сети.

Представлен алгоритм расчета токов и напряжений, наведенных электрическим полем работающей воздушной линии (ВЛ) электропередачи вдоль отключенной и заземленной параллельной ВЛ. Показано совпадение результатов расчета при использовании параметров ВЛ, полученных вне «мертвой зоны» по методу Карсона и методу  $h_{eq}$  не имеющему «мертвой зоны».

## 1. Введение

Линейный персонал, проводящий работы на отключенной и заземленной воздушной линии (ВЛ) электропередачи, подвергается воздействию напряжения, которое наведено магнитным и электрическим полями (МП и ЭП), создаваемыми проходящими рядом работающими ВЛ. Напряжения, наводимые МП, превышают значения напряжений, наводимых ЭП, но если воздействующая линия не нагружена и ток в ней отсутствует, то отсутствует и создаваемое этим током МП. В этом случае напряжения, наведенные на отключенной ВЛ ЭП воздействующей линии, становятся определяющими и для обеспечения безопасности персонала значения этих напряжений должны быть рассчитаны.

## 2. Параметры заземленной линии по методу Карсона и методу $h_{eq}$

Удельные собственное индуктивное сопротивление  $Z_{ii}^{(Kap)}$  однопроводной (однофазной) воздушной линии  $i$  и взаимное индуктивное сопротивление  $Z_{ik}^{(Kap)}$  между параллельными однопроводными ВЛ  $i$  и  $k$  по методу Карсона определяются выражениями [1, 2]:

$$Z_{ii}^{(Kap)} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \left( \ln \frac{\sqrt{2}\delta_s}{r_i} - j\frac{\pi}{4} + \frac{4}{3} \frac{h_i}{\delta_s} (1+j) - 0,0772 \right), \text{ Ом/м} \quad (1)$$

$$Z_{ik}^{(Kap)} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \left( \ln \frac{\sqrt{2}\delta_s}{r_{ik}} - j\frac{\pi}{4} + \frac{2}{3} \frac{h_i + h_k}{\delta_s} (1+j) - 0,0772 \right), \text{ Ом/м} \quad (2)$$

где  $\mu_0$  — магнитная постоянная;

$h_i$  и  $h_k$  — высота расположения над землей проводов  $i$  и  $k$ ;

$r_i$  — радиус провода  $i$ ;

$r_{ik}$  — расстояние между проводами  $i$  и  $k$ ;

$\delta_s = \sqrt{2\rho_s / (\omega\mu_0)}$  — глубина проникновения в зем-

лю, т.е. глубина, проникнув на которую электромагнитная волна затухает в  $e = 2,72$  раза;

$\rho_s$  — удельное сопротивление земли.

Расчет индуктивного сопротивления по выражению (2) имеет так называемую «мертвую зону», при

параметре  $r$  больше 0,25 и меньше 5, в которой рассчитанное значение  $Z_{ik}^{(Kap)}_0$  во много раз превышает истинное [1, 3, 4]. Для устранения «мертвой зоны» предложен метод  $h_{equ}$ , в котором магнитное поле (МП) линии состоит из МП, создаваемого непосредственно током линии, МП, создаваемого наведенными в земле токами, и МП, создаваемого обратным током в земле [3, 4]. Метод  $h_{equ}$  не содержит «мертвых зон», а вне этих зон результаты расчетов практически полностью совпадают с результатами по методу Карсона.

Собственное сопротивление однопроводной линии  $i$  протяженностью  $l_i$  по методу  $h_{equ}$  содержит удельное собственное индуктивное сопротивление, определяемое током линии [3, 4]:

$$jX_{L_i} = j \frac{\omega \mu_0 l_i}{2\pi} \ln \frac{h_i + h_{equ}}{r_i}, \text{ Ом}, \quad (3)$$

сопротивление, определяемое наведенными в земле токами:

$$Z_{L_{\eta}} = \frac{\omega^2 \mu_0^2 l_i}{8\pi^2 \rho_3} \int_{-h_i}^{h_{equ}} \int_{y^-}^{y^+} \int_0^{2h_{equ}} \frac{(X-x) \ln \frac{y^2 + (h_1 + h_{equ})^2}{y^2 + (h_1 + x)^2}}{(X-x)^2 + y^2} dx dy dX, \quad (4)$$

Ом,

а также сопротивление участка земли длиной  $l_i$  между заземляющими устройствами (ЗУ), установленными в конце и в начале линии  $i$ , в котором протекает обратный ток линии:

$$R_3 = \frac{1}{\int_{y^-}^{y^+} \int_{x^-}^{x^+} \frac{1}{\rho_3 (l_i + 2\sqrt{x^2 + y^2})} dx dy}, \text{ Ом}. \quad (5)$$

### 3. Отключенная линия заземлена на одном конце

Рассмотрим две однопроводные параллельные ВЛ  $i$  и  $k$  длиной  $l_i$  и  $l_k$ , причем  $l_k \geq l_i$ . Обе линии выполнены проводом радиусом  $r_i = 0,014$  м и расположены над землей на высоте  $h_i = 17,5$  м и  $h_k = 19,0$  м. Расстояние по земле между линиями равно  $a$ . ВЛ  $k$  находится в режиме холостого хода с напряжением  $\dot{U}_k = 127$  кВ, а линия  $i$ , в которой электрическим полем (ЭП) ВЛ  $k$  наводится напряжение, отключена и заземлена на одном конце. Линия  $i$  имеет протяженность  $l_i = 100$  км.

При расчете для  $r \leq 0,25$  параметров линии  $i$  на 1000 м с  $\rho_3 = 100$  Ом·м получим следующие значения, которые будем считать удельными, отнесенными к 1 км ее длины:  $\text{Re}[Z_{ii}^{(Kap)}] = 0,0473$  Ом/км;  $\text{Im}[Z_{ii}^{(Kap)}] = j0,716$  Ом/км;  $Z_{L_{\eta}} = 0,0414$  Ом/км;

$R_{30} = 0,0006$  Ом/км и  $X_{L_i} = 0,715$  Ом/км. Удельное сопротивление провода  $R_{\Lambda 0} = 0,074$  Ом/км, удельная емкость  $C_{ki0}$  между проводами линий  $k$  и  $i$  для расстояния  $a = 50$  м составляет  $C_{ki0} = 1,918 \times 10^{-10}$  Ф/км, а для  $a = 5$  м  $C_{ki0} = 1,870 \times 10^{-9}$  Ф/км.

Введем следующие обозначения:

- удельная емкостная проводимость между линиями  $k$  и  $i$   $Y_{C0} = j\omega C_{ki0}$ ;
- удельное сопротивление линии  $i$  по методу Карсона  $Z_{\Lambda 0} = R_{\Lambda 0} + j\text{Im}[Z_{ii}^{(Kap)}]$ , по методу  $h_{equ}$   $Z_{\Lambda 0} = R_{\Lambda 0} + jX_{L_i}$ ;
- сопротивление земли на 1 км по методу Карсона  $Z_{30} = \text{Re}[Z_{ii}^{(Kap)}]$  по методу  $h_{equ}$   $Z_{30} = R_{30} + Z_{L_{\eta}}$ .

Электрическая схема параллельных ВЛ  $i$  и  $k$  показана на рис. 1.

На рис. 1:  $R_{ki}$  — сопротивление между ЗУ последней опоры линии  $i$  и ЗУ источника линии  $k$ , включая величину сопротивления ЗУ источника.

Величину тока в линии  $i$  можно определить по закону Ома:

$$\dot{I}_{\text{Ом}}(l) = \frac{\dot{E}_k}{Z_{\Lambda 0}(l_i - l) + \frac{1}{Y_{C0}}(l_i - l) + R_{3Y} + Z_{30}l_i + R_{ki}}. \quad (6)$$

Изменение модуля и аргумента тока  $\dot{I}_{\text{Ом}}(l)$  вдоль линии  $i$  для расстояния между линиями  $a = 50$  м показано на рис. 2. При  $l = 0$   $I_{\text{Ом}}(0) = 0,764$  А.

Элементарный ток  $d\dot{I} = Y_{C0} \dot{E}_k dl$ , проходящий через очень малую проводимость  $Y_{C0} dl$ , может быть рассмотрен как элементарный источник тока, тогда схема на рис. 1 преобразуется в схему на рис. 3.

В этом случае ток в линии  $i$  определяется по выражению  $\dot{I}(l) = Y_{C0} \dot{E}_k (l_i - l)$ , кривые изменение его модуля и аргумента, показанные на рис. 2, практически полностью совпадают с аналогичными кривыми для тока  $\dot{I}_{\text{Ом}}(l)$ .

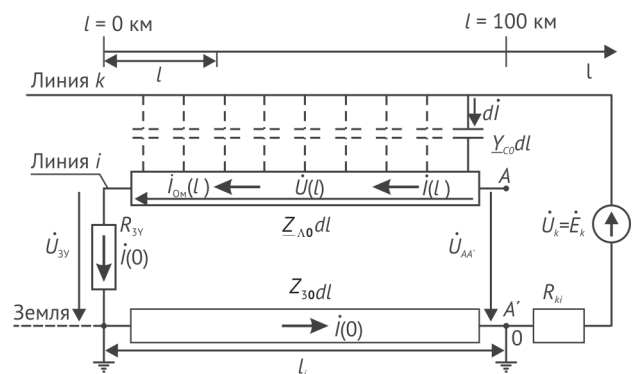


Рис. 1. Параллельные ВЛ: работающая  $k$  и отключенная и заземленная на одном, удаленном от подстанции конце, линия  $i$

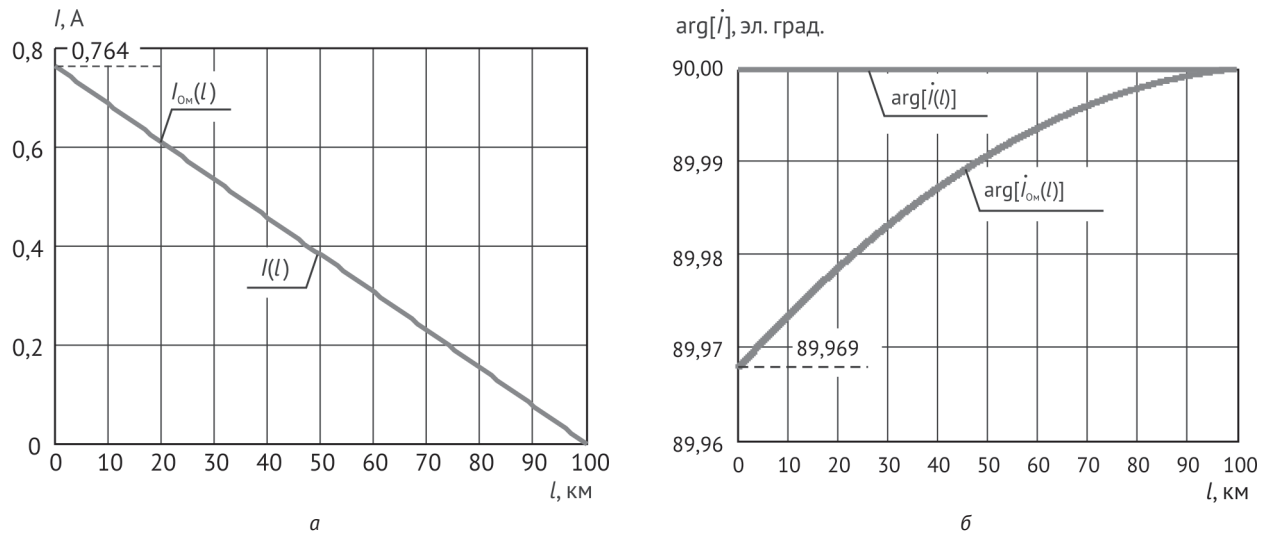


Рис. 2. Распределение модулей (а) и аргументов (б) токов  $I_{\text{ом}}(l)$  и  $I(l)$  вдоль провода заземленной с удаленного от подстанции конца линии  $i$

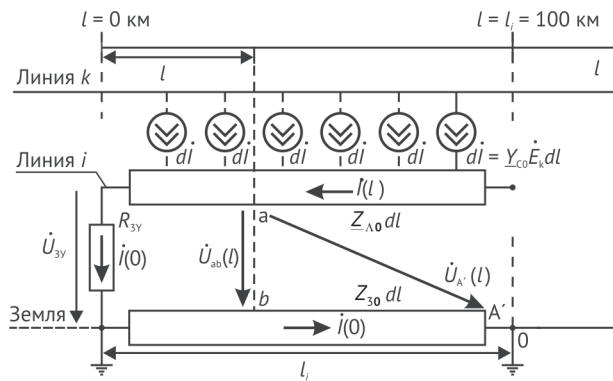


Рис. 3. Параллельные ВЛ с элементарными источниками тока между ними

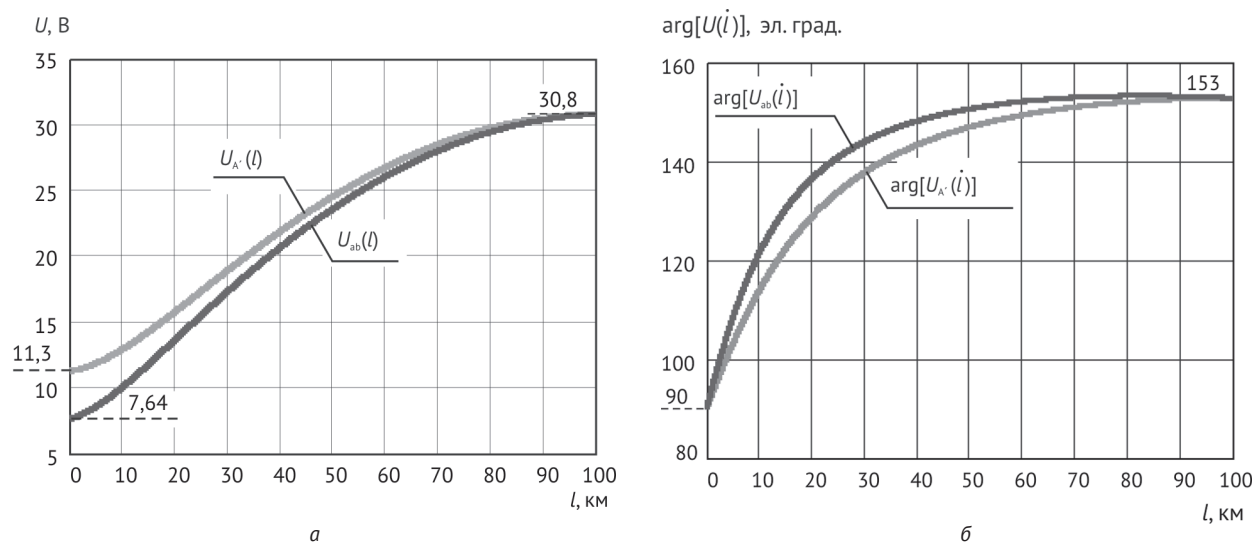


Рис. 4. Распределение модуля (а) и аргумента (б) напряжений  $\dot{U}_{\text{об}}(l)$  и  $\dot{U}_{\text{к}}(l)$  вдоль линии  $i$  при изменении  $l$  от 0 до  $l_i = 100$  км

Напряжение  $\dot{U}_{ab}(l)$  при движении вдоль ВЛ  $i$  описывается выражением:

$$\dot{U}_{ab}(l) = \int_0^l \dot{I}(l) Z_{\Lambda 0} dl + \dot{I}(0) (R_{3Y} + Z_{30} l).$$

Подставляя в последнее выражение  $\dot{I}(l) = \underline{Y}_{C0} \dot{E}_k (l_i - l)$  и  $\dot{I}(0) = \underline{Y}_{C0} \dot{E}_k l_i$ , получим

$$\dot{U}_{ab}(l) = \underline{Y}_{C0} \dot{E}_k \left[ Z_{\Lambda 0} \left( l_i l - \frac{1}{2} l^2 \right) + (R_{3Y} + Z_{30} l) l_i \right]. \quad (6)$$

Кривые изменения модуля и аргумента напряжения  $\dot{U}_{ab}(l)$  показаны на рис. 4, где также представлены аналогичные кривые напряжения  $\dot{U}_{A'}(l)$  между точкой  $a$  и узлом  $A'$ , потенциал последнего принят равным нулю:

$$\dot{U}_{A'}(l) = \dot{I}(0) (R_{3Y} + Z_{30} l) + \underline{Y}_{C0} \dot{E}_k Z_{\Lambda 0} \left( l_i l - \frac{l^2}{2} \right).$$

#### 4. Отключенная линия заземлена по обоим концам

Рассмотрим вариант, когда линия  $i$  заземлена по двум концам с помощью ЗУ1 и ЗУ2, как показано на рис. 5.

При  $l = l_0$  ток  $\dot{I}(l)$  меняет направление: для  $l > l_0$  он направлен к ЗУ2, а для  $l < l_0$  — к ЗУ1. Расстояние  $l_0$  определяется по выражению:

$$l_0 = \frac{R_{3Y2} + \frac{1}{2} Z_{\Lambda 0} l_i}{R_{3Y1} + R_{3Y2} + Z_{30} l_i + Z_{\Lambda 0} l_i} l_i. \quad (7)$$

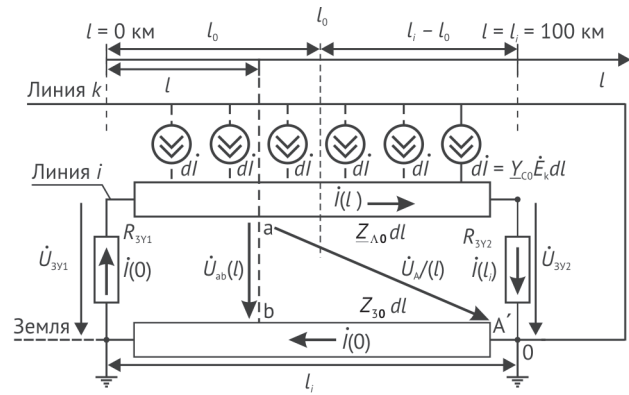
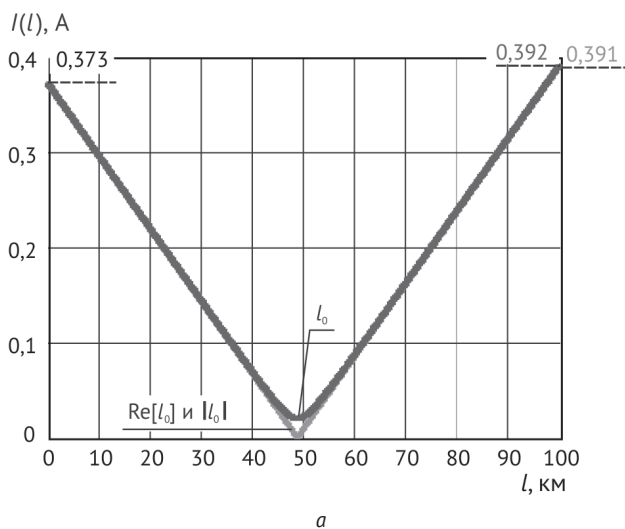


Рис. 5. Схема заземления линии  $i$  по двум концам с помощью ЗУ1 и ЗУ2

Следует отметить, что  $l_0$  является комплексной величиной.

Ток  $\dot{I}(l)$  в линии определяется выражением:

$$\dot{I}(l) = \underline{Y}_{C0} \dot{E}_k (l_i - l_0). \quad (8)$$

Распределение модуля и аргумента тока  $\dot{I}(l)$  вдоль линии  $i$  при  $a = 50$  м,  $R_{3Y1} = R_{3Y2} = 10$  Ом, для  $l_0 = 48,8 + j2,6$  км,  $\text{Re}[l_0] = 48,8$  км и  $|l_0| = 48,9$  км показано на рис. 6.

Распределение напряжений  $\dot{U}_{ab}(l)$  и  $\dot{U}_{A'}(l)$  описывается выражениями (9) и показано на рис. 7.

$$\dot{U}_{ab}(l) = \underline{Y}_{C0} \dot{E}_k \left[ (R_{3Y1} + Z_{30} l) l_0 - Z_{\Lambda 0} \left( \frac{l^2}{2} - l_0 l \right) \right], \quad (9)$$

$$\dot{U}_{A'}(l) = \underline{Y}_{C0} \dot{E}_k \left[ (R_{3Y1} + Z_{30} l) l_0 - Z_{\Lambda 0} \left( \frac{l^2}{2} - l_0 l \right) \right].$$

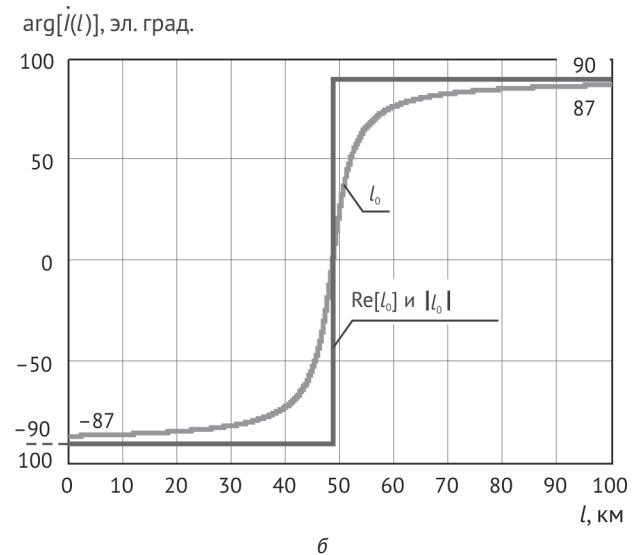


Рис. 6. Распределение модуля (а) и аргумента (б) тока  $\dot{I}(l)$  вдоль линии  $i$  с  $a = 50$  м,  $R_{3Y1} = R_{3Y2} = 10$  Ом, для  $l_0$ ,  $\text{Re}[l_0]$  и  $|l_0|$  при изменении  $l$  от 0 до  $l_i = 100$  км

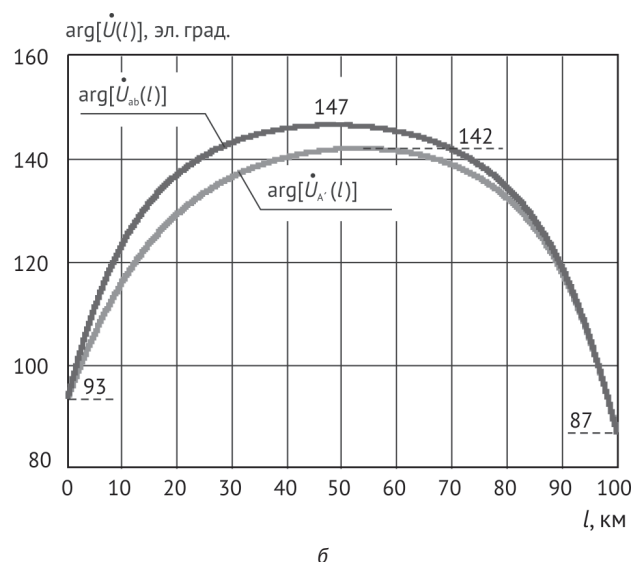
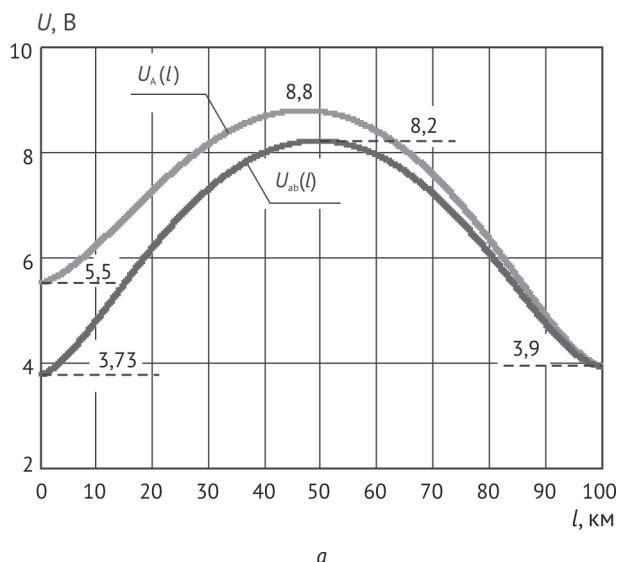


Рис. 7. Распределение модуля (а) и аргумента (б) напряжений  $\dot{U}_{ab}(l)$  и  $\dot{U}_{A'}(l)$  вдоль заземленной по концам линии  $i$  для  $R_{3Y1} = R_{3Y2} = 10$  Ом и изменении  $l$  от 0 до  $l_i = 100$  км и  $a = 50$  м

Рассмотрим те же однопроводные параллельные линии  $i$  и  $k$ , но расположенные на расстоянии друг от друга  $a = 5$  м. В этом случае частичная емкость между линиями составит  $C_{ki0} = 1,870 \times 10^{-9}$  Ф/км.  $R_{3Y1} = R_{3Y2} = 10$  Ом. Величина  $l_0$  при этом не изменится  $l_0 = 48,8 + j2,6$  км. На рис. 8 показано распределение значений модуля и аргумента тока  $\dot{I}(l)$  вдоль линии  $i$  для значений  $l_0$ ,  $\text{Re}[l_0]$  и  $|l_0|$ .

Распределения модуля и аргумента напряжения  $\dot{U}_{A'}(l)$  показано на рис. 9.

Уменьшение расстояния между линиями в 10 раз привело к увеличению почти на порядок частичной емкости  $C_{ki0}$ , что дало увеличение почти в 10 раз модулей токов и напряжений вдоль линии  $i$ .

Кривые распределения токов и напряжений, полученные при  $r < 0,25$  для параметров линии, рассчитанных как по методу Карсона, так и по методу  $h_{\text{equ}}$ , практически полностью совпадают.

### 5. Участок в середине линии заземлен по двум концам

Алгоритмы, использующие уравнения (1)–(9), позволяют определить распределение тока и напряжения вдоль линии  $i$  с более сложной схемой заземления. На рис. 10 показана схема двух параллельных ВЛ  $i$  и  $k$ , расположенных на расстоянии по земле  $a = 5$  м друг от друга. Участок 2 линии  $i$  протяженностью 1 км заземлен по концам ЗУ с сопротивлениями

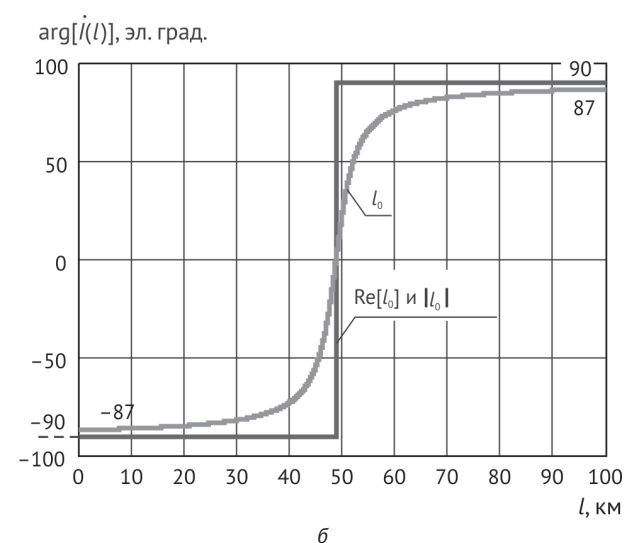
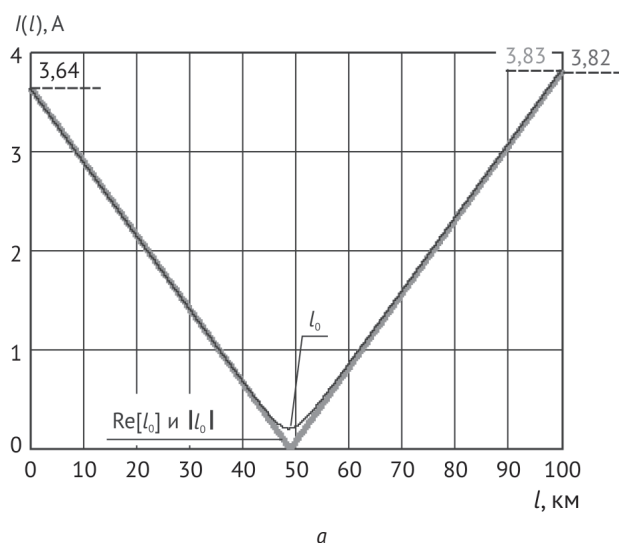


Рис. 8. Распределение модуля (а) и аргумента (б) тока  $\dot{I}(l)$  вдоль линии  $i$  при  $a = 5$  м и изменении  $l$  от 0 до  $l_i = 100$  км

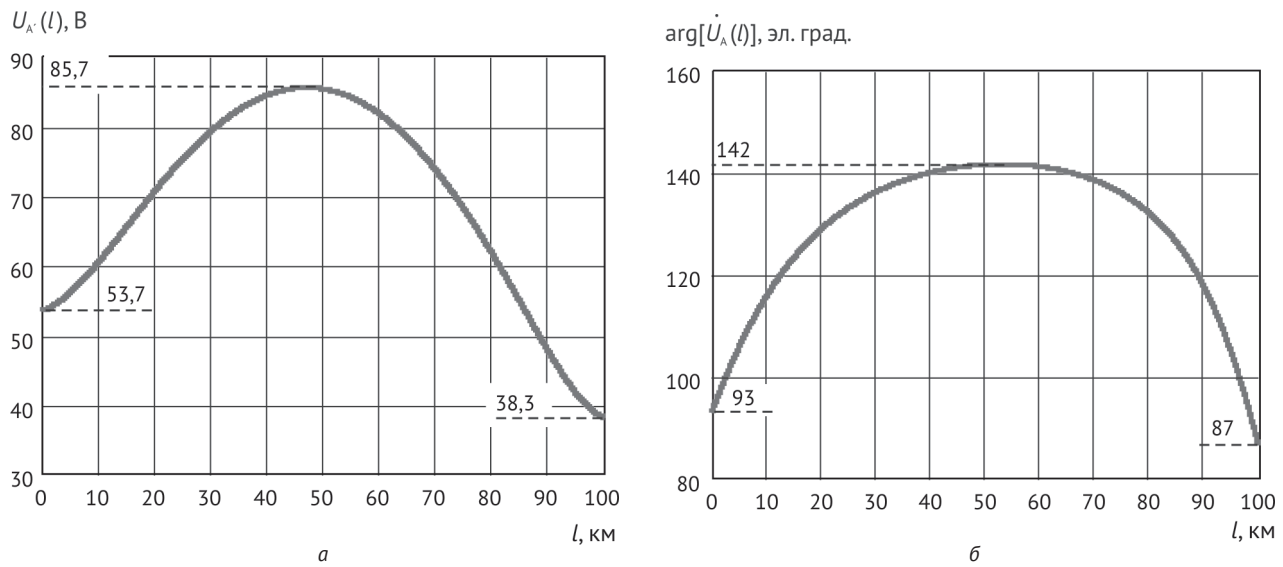


Рис. 9. Распределение модуля (а) и аргумента (б) напряжения  $\dot{U}_A(l)$  вдоль линии  $i$  при  $a = 5$  м и изменении  $l$  от 0 до  $l_i = 100$  км

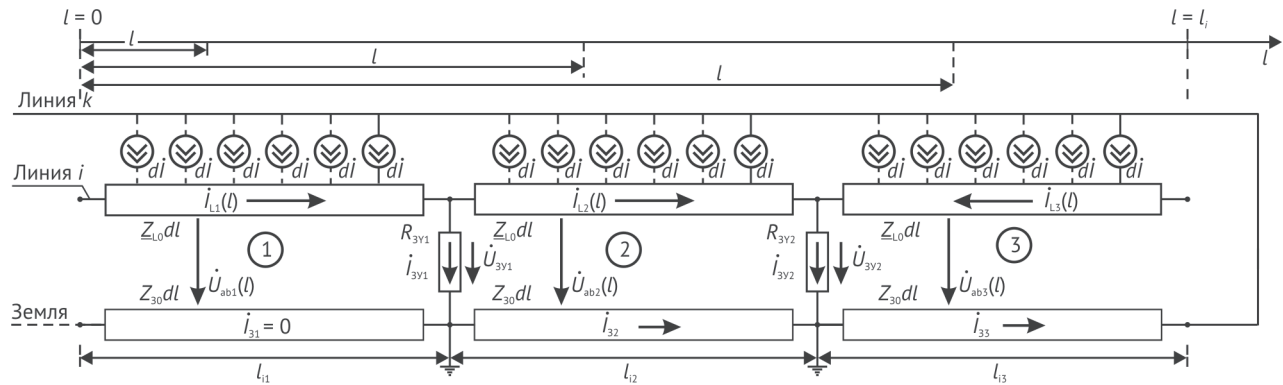


Рис. 10. Схема двух параллельных ВЛ  $i$  и  $k$  с заземлением участка линии  $i$  двумя ЗУ

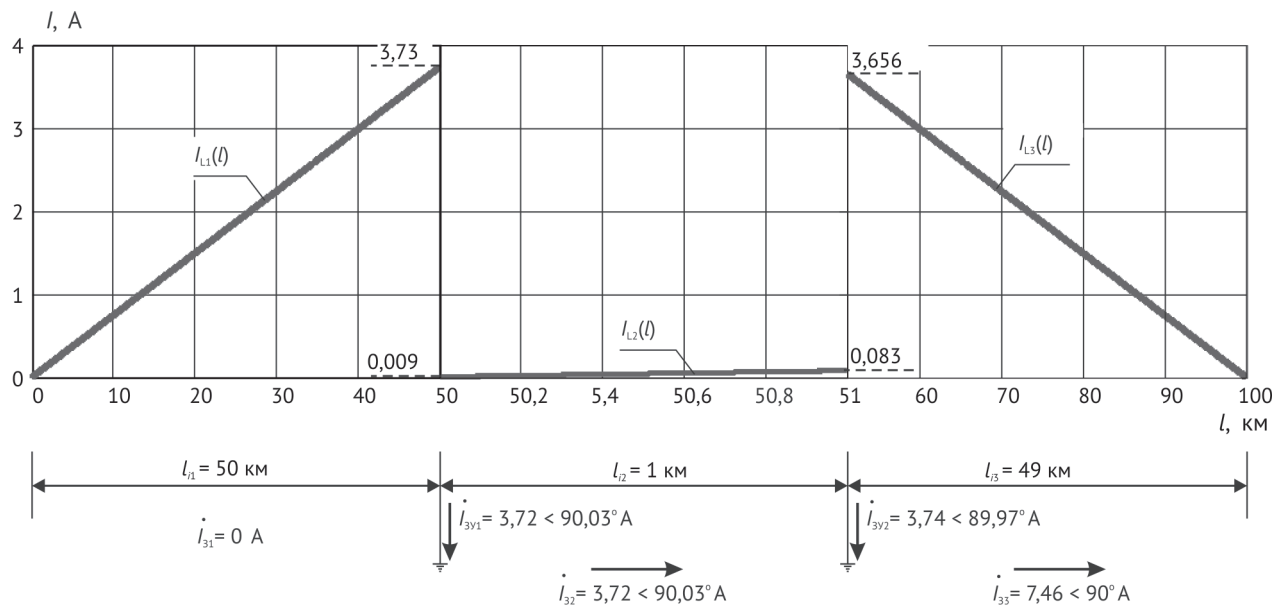


Рис. 11. Распределение модулей токов вдоль линии  $i$

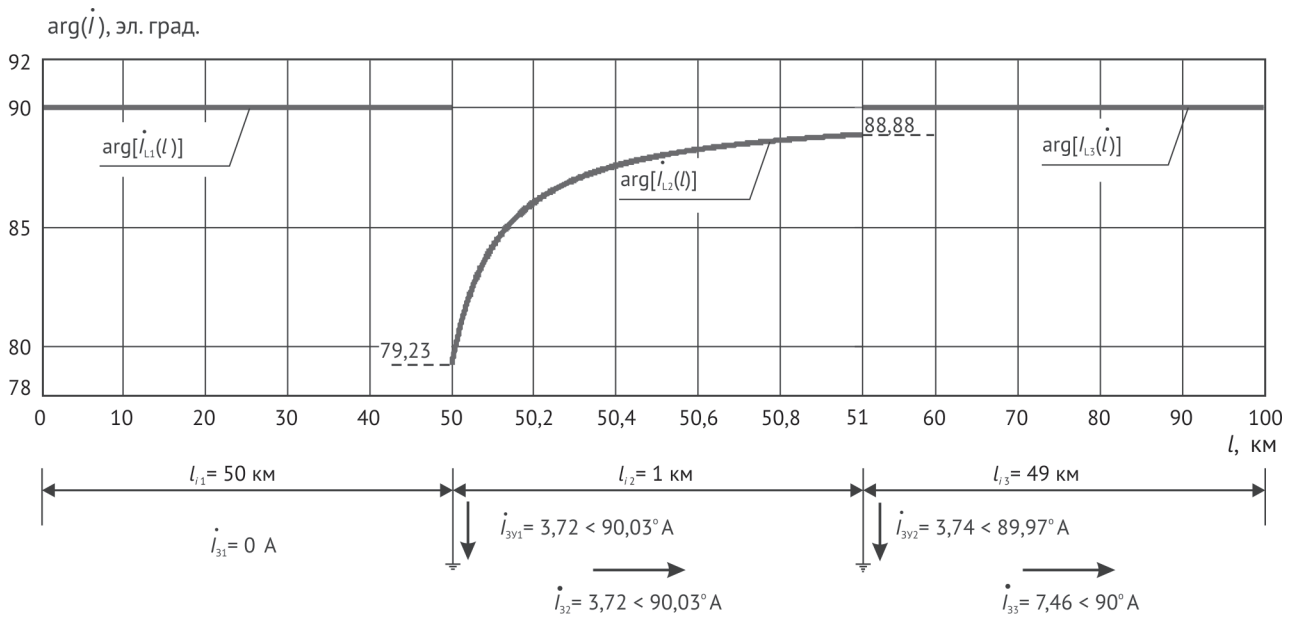


Рис. 12. Распределение аргументов токов вдоль линии  $i$

$R_{3Y1} = R_{3Y2} = 10$  Ом и делит ВЛ на три участка протяженностью  $l_{11} = 50$  км,  $l_{12} = 1$  км и  $l_{13} = 49$  км.

На рис. 11 дано распределение модулей, а на рис. 12 — аргументов токов вдоль линии  $i$ .

На рис. 13 дано распределение модуля, а на рис. 14 — аргумента напряжения  $\dot{U}_{ab}(l)$  вдоль линии  $i$ .

### 6. Заключение

Результаты расчета напряжения, наведенного ЭП на отключенной и заземленной ВЛ, которые получены с использованием параметров ВЛ, определенных

по методу  $h_{equ}$ , вне «мертвой зоны», практически полностью совпадают с результатами, полученными по методу Карсона. Представленный алгоритм дает возможность рассчитать распределение напряжения вдоль отключенной и заземленной ВЛ, а использование метода суперпозиции (наложения) позволит применить его для трехфазных параллельных воздействующих линий. Это позволяет точнее оценивать безопасность проведения работ в электрических сетях.

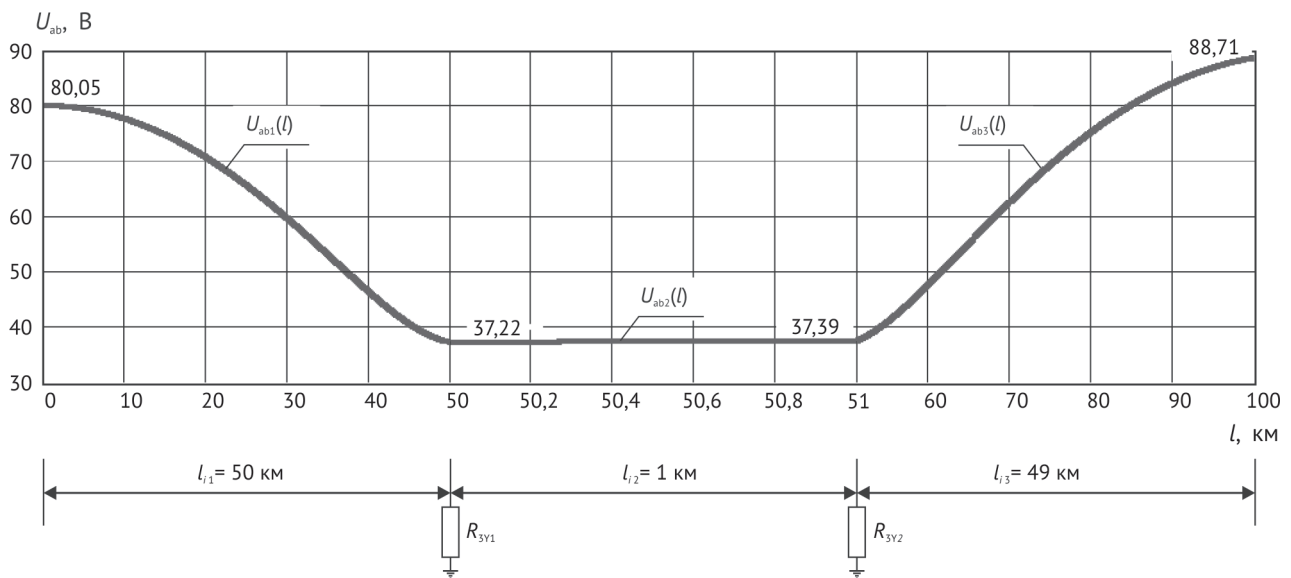


Рис. 13. Распределение модуля напряжения  $\dot{U}_{ab}(l)$  вдоль линии  $i$



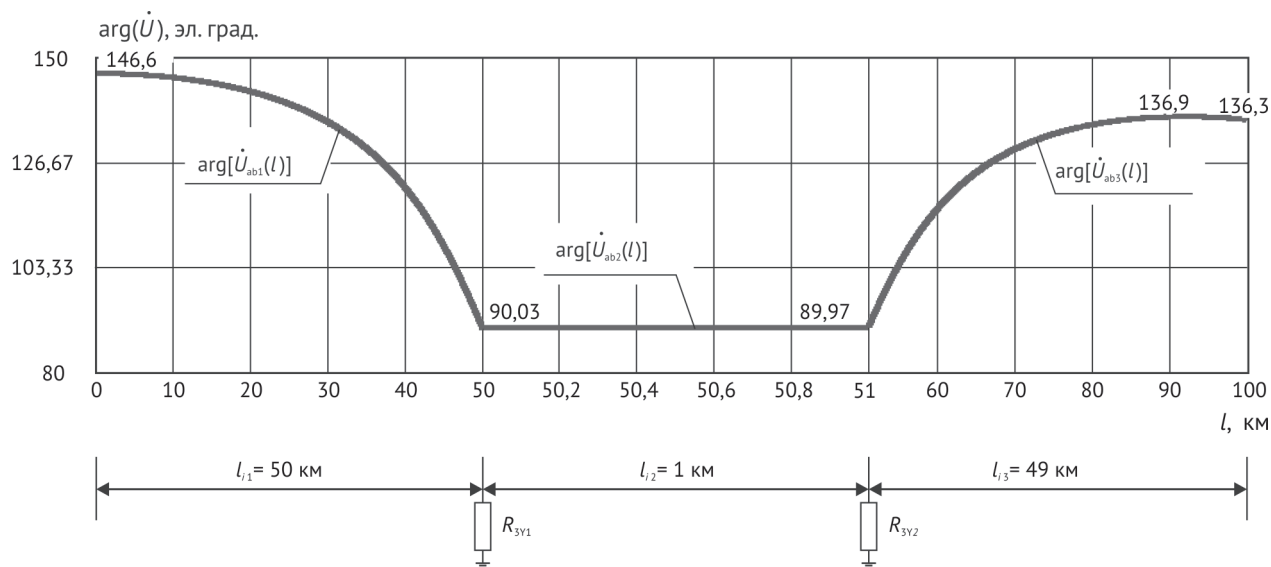


Рис. 14. Распределение аргумента напряжения  $\dot{U}_{ab}(l)$  вдоль линии  $i$

#### Литература

1. Костенко М.В., Перельман Л.С., Шкарин Ю.П. Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях высокого напряжения. — М.: Энергия, 1973.
2. Цицикян Г.Н. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике. — СПб.: Элмор, 2007.
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. Rubtsova N.B., Misrikhanov M.Sh., Murzin S.G., Tokarskiy A.Yu. Longitudinal voltages, induced by parallel overhead transmission lines magnetic fields // PIERS Proceeding, Stockholm, Sweden, Aug. 12–15, 2013, p. 305–309.

#### 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 Publ., 1973. 272 p (in Russian).
2. Tsitsikjan G.N. Electromagnetic compatibility in electric power industry. St. Petersburg, ELMOR 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. ELECTRO. 2010, I. 3, pp. 13–18 (in Russian).
4. Rubtsova N.B., Misrikhanov M.Sh., Murzin S.G., Tokarskiy A.Yu. Longitudinal voltages, induced by parallel overhead transmission lines magnetic fields. PIERS Proceeding, Stockholm, Sweden, Aug. 12–15. 2013. P. 305–309.

## Distribution of Voltage Induced by Parallel Transmission Line Along Dead and Grounded Line

**A.Yu. Tokarskiy**, Team Manager, Leading Expert, Doctor of Technical Science, Associate Professor, FSBSI “Scientific Research Institute of Occupational Health”, Moscow, Russia, JSC “Scientific-Technical Center of United Energy System Federal Grid Company”, Moscow, Russia

**N.B. Rubtsova**, Head of the Scientific-Coordination Department, Doctor of Biological Science, Professor, FSBSI “Scientific Research Institute of Occupational Health”, Moscow, Russia

*Calculation algorithm for currents and voltages induced by electric field of operating overhead transmission line (OTL) along dead and grounded parallel OTL is presented. The data indicates the coincidence of the results of calculation under OTL parameters outside the “dead zone” obtained by Carson’ method and calculation with  $h_{equ}$  method not having a “dead zone”.*

**Keywords:** single-wire transmission line, electric field, own resistance, mutual own resistance, induced voltage and currents, voltage distribution along transmission line.