

УДК 621.316

## Распределение напряжения по двухцепной линии электропередачи

Г.А. Большанин<sup>1</sup>, М.П.Плотников<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия. E-mail: plotnikov\_m.p@mail.ru  
Статья поступила 6.02.2012, принята 19.11.2012

*Рассмотрен участок двухцепной линии электропередачи (ЛЭП). Предложена расчетная электрическая схема замещения двухцепной ЛЭП. Линия электропередачи представляется в виде совокупности однородных линий, а электрическая энергия – как результат воздействия падающей и отраженной волны. Расчет распределения гармонических составляющих электрической энергии выполнен на основании решения уравнений с гиперболическими функциями по двум переменным: протяженности прогнозируемого участка и частоты. Построены графики распределения напряжения по однородному участку двухцепной ЛЭП шестипроводного исполнения протяженностью 1000 км. Также построены графики по одноцепной ЛЭП трехпроводного исполнения протяженностью 1000 км. Даны рекомендации по улучшению передачи напряжения по двухцепной ЛЭП. Выявлена зависимость законов распределения напряжения от параметров линии и от угла сдвига фаз между током и напряжением. Приведены результаты сравнительного анализа законов изменения напряжения по однородному участку двухцепной ЛЭП шестипроводного исполнения с законами распределения напряжения по одноцепной ЛЭП трехпроводного исполнения.*

**Ключевые слова:** двухцепная ЛЭП, одноцепная ЛЭП, однородный участок ЛЭП, длина волны, электромагнитное поле, постоянная распределения, волновое сопротивление, распределенные параметры, математическая модель, падающая и отраженная волна электромагнитного поля.

## Two-chain power transmission line voltage distribution

G.A. Bolshanin<sup>1</sup>, M.P. Plotnikov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Bratsk State University, 40, Makarenko str., Bratsk, Russia. E-mail: plotnikov\_m.p@mail.ru  
The article received 6.02.2012, accepted 19.11.2012

*The site of a two-chain power line (PTL) is considered. The settlement electric circuit of replacement of two-chain PTL is offered. The power line is represented in the form of set of homogeneous lines, and electric energy as result of influence of the falling and reflected wave. Calculation of distribution of harmonious components of electric energy is executed on the basis of the solution of the equations with hyperbolic functions on two variables: extents of a predicted site and frequency. Schedules of distribution of tension on a homogeneous site of two-chain PTL of six-wire execution, are constructed by extent of 1000 km. Schedules on one-chain PTL of three-wire execution, are also constructed by extent of 1000 km. Recommendations about improvement of transfer of tension about two-chain PTL are made. Dependence of laws of distribution of tension on parameters of the line and on a corner of shift of phases between a current and tension is revealed. Results of the comparative analysis of laws of change of tension on a homogeneous site of two-chain PTL of six-wire execution with laws of distribution of tension on one-chain PTL of three-wire execution are given.*

**Keywords:** two-chain PTL, the one-chain PTL a homogeneous site of PTL, length of a wave, an electromagnetic field, a distribution constant, the wave resistance, the distributed parameters, the mathematical model falling and the reflected wave of an electromagnetic

На территории Российской Федерации для передачи электрической энергии потребителям нередко используются двухцепные ЛЭП большой протяженности. Электрическая энергия характеризуется следующими показателями качества: несимметрией, несинусоидальностью, отклонениями и колебаниями напряжений и токов и т.д. [1]. Интерес представляет распределение напряжения по двухцепным ЛЭП в условиях пониженного качества электрической энергии.

Целью данной работы является выявление законов различий в распределении напряжения по двухцепной ЛЭП шестипроводного исполнения с одноцепной ЛЭП трехпроводного исполнения.

Распределение напряжения по трехпроводной ЛЭП обеспечивается тремя парами волн электромагнитного

поля тремя падающими и тремя отраженными волнами. В процессе передачи электрической энергии происходит наложение трех пар волн в каждой линии электропередачи. В процессе передачи электрической энергии по двухцепной ЛЭП шестипроводного исполнения происходит наложение шести падающих и шести отраженных волн электромагнитного поля, что соответственно должно привести к быстрому изменению периода волны [2].

Так как напряжение и ток являются функциями времени и расстояния ЛЭП, то в модели необходимо использовать частные производные.

Так, если в выделенный участок ЛЭП длиной  $d_l$  входит ток  $i_n$ , то выходит из этого участка в тот же момент времени измененный по величине ток

$i_n + \frac{\partial i_n}{\partial l} \cdot dl$ ; если на входе выделенного участка напряжение определяется величиной  $U_n$ , то в тот же момент времени на выходе напряжение определяется величиной  $u_n + \frac{\partial u_n}{\partial l} \cdot dl$  [3].

Таким образом, в схеме на рис. 1 будут присутствовать шесть фазных токов и напряжения, а также пятнадцать линейных напряжений. Тогда рабочая математическая модель однородного элементарного участка двухцепной ЛЭП будет состоять из двадцати семи уравнений.

Выражение для тока в фазе  $A'$  первой цепи имеет вид:

$$i_{A'n} = di_{A'n} + di_{A'B'n} + di_{A'A''n} + di_{A'B''n} - di_{C'A'n} - di_{C''A'n} + i_{A'n} + \frac{\partial i_{A'n}}{\partial l} \cdot dl \quad ; \quad (1)$$

где  $di_{A'n}$ ,  $di_{A'B'n}$ ,  $di_{A'A''n}$ ,  $di_{A'B''n}$ ,  $di_{C'A'n}$ ,  $di_{C''A'n}$  - емкостные «токи утечки» по соответствующим электромагнитным связям.

Напряжение в фазе  $A'$  для первой цепи:

$$u_{A'n} = i_{A'n} \cdot R_{0A'n} \cdot dl + L_{0A'n} \cdot \frac{\partial i_{A'n}}{\partial t} + M_{0A'B'n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{B'n}}{\partial t} + M_{0C'A'n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{C'n}}{\partial t} + M_{0A'A''n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{A''n}}{\partial t} + M_{0A'B''n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{B''n}}{\partial t} + M_{0C''A'n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{C''n}}{\partial t} + u_{A'n} + \frac{\partial u_{A'n}}{\partial l} \cdot dl \quad ; \quad (2)$$

где  $R_{0A'n}$  - погонное активное сопротивление провода;  $L_{0A'n}$  - погонное индуктивное сопротивление провода;  $M_{0A'B'n}$ ,  $M_{0C'A'n}$ ,  $M_{0A'A''n}$ ,  $M_{0A'B''n}$ ,  $M_{0C''A'n}$  - количественная оценка индуктивных связей между проводами [3].

Совместное решение этих уравнений определит законы изменения напряжения и тока вдоль однородного участка шестипроводной ЛЭП.

В частности, для фазы  $A'$ , первой цепи уравнение напряжения примет следующий вид:

$$\dot{U}_{A'n} = \dot{U}_{1A'n} \cdot ch\gamma_{1n}l - \dot{I}_{1A'n} \cdot Z_{cA'1n} \cdot sh\gamma_{1n}l + \dot{U}_{1A'n} \cdot ch\gamma_{2n}l - \dot{I}_{1A'n} \cdot Z_{cA'2n} \cdot sh\gamma_{2n}l +$$

$$+ \dot{U}_{1A'n} \cdot ch\gamma_{3n}l - \dot{I}_{1A'n} \cdot Z_{cA'3n} \cdot sh\gamma_{3n}l + \dot{U}_{1A'n} \cdot ch\gamma_{4n}l - \dot{I}_{1A'n} \cdot Z_{cA'4n} \cdot sh\gamma_{4n}l + \dot{U}_{1A'n} \cdot ch\gamma_{5n}l - \dot{I}_{1A'n} \cdot Z_{cA'5n} \cdot sh\gamma_{5n}l + \dot{U}_{1A'n} \cdot ch\gamma_{6n}l - \dot{I}_{1A'n} \cdot Z_{cA'6n} \cdot sh\gamma_{6n}l \quad ; \quad (3)$$

где  $Z_{cA'1n}$ ,  $Z_{cA'2n}$ ,  $Z_{cA'3n}$ ,  $Z_{cA'4n}$ ,  $Z_{cA'5n}$ ,  $Z_{cA'6n}$  - собственные волновые сопротивления в фазе  $A'$ ;  $\gamma_{1n}$ ,  $\gamma_{2n}$ ,  $\gamma_{3n}$ ,  $\gamma_{4n}$ ,  $\gamma_{5n}$ ,  $\gamma_{6n}$  - постоянные распространения электромагнитной волны по однородному участку двухцепной шестипроводной ЛЭП на частоте  $n$ -ой гармонической составляющей.

Для синусоидального тока и напряжения комплексное действующее значение можно записать в показательной, тригонометрической и алгебраической форме.

В частности для фазы  $A'$ :

$$\dot{I}_{A'n} = I_{A'n} \cdot e^{j\varphi_i} = I_{A'n} \cdot (\cos \varphi_i + j \sin \varphi_i) = I_{A'n a} + j I_{A'n p} \quad ; \quad (4)$$

$$\dot{U}_{A'n} = U_{A'n} \cdot e^{j\varphi_u} = U_{A'n} \cdot (\cos \varphi_u + j \sin \varphi_u) = U_{A'n a} + j U_{A'n p} \quad ; \quad (5)$$

В данной работе будем рассматривать участки элементарной протяженности для однородного участка ЛЭП.

Для примера рассмотрим двухцепную ЛЭП шестипроводного исполнения и одноцепную трхпроводного исполнения. Каждая ЛЭП выполнена проводом марки АС-95/16 с линейным напряжением в начале ЛЭП 37500 В. Фазное напряжение в начале ЛЭП равно 20207 В. Сила тока в начале каждой ЛЭП равна 100 А.

По формуле 3 был произведен расчет напряжения прямой последовательности, где  $\dot{U} = 20207 \cdot e^{j0}$  и  $\dot{I} = 100 \cdot e^{-j10}$ , на частоте 50 Гц для одноцепной ЛЭП. По полученным результатам была построена графическая зависимость напряжения от расстояния, представленная на рис. 1.

Из рис. 2 видно, что длина волны в данном случае составляет примерно 6000 км, что вполне справедливо согласуется с классической теорией о распространении электромагнитного поля по однопроводной линии [4].

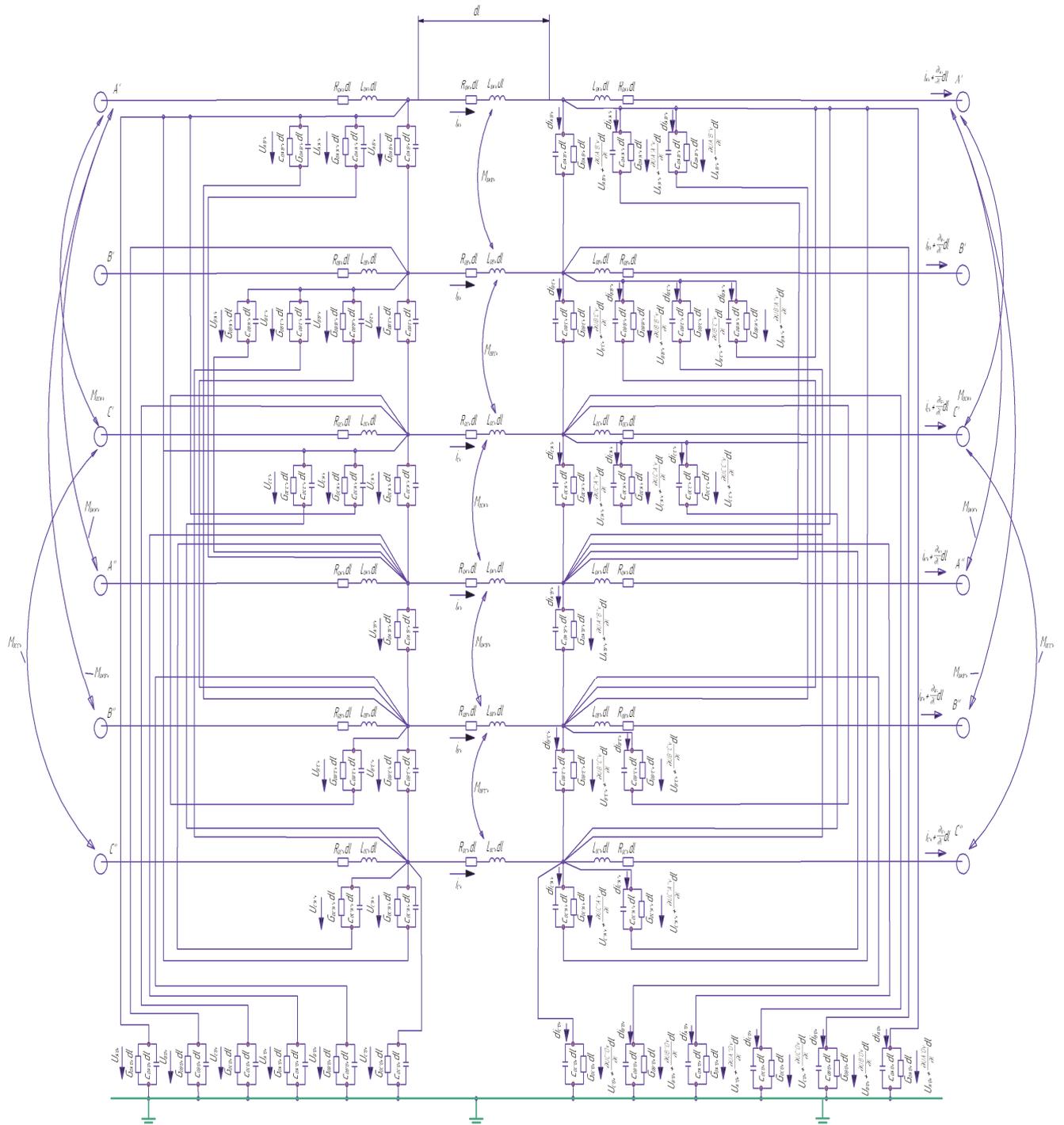
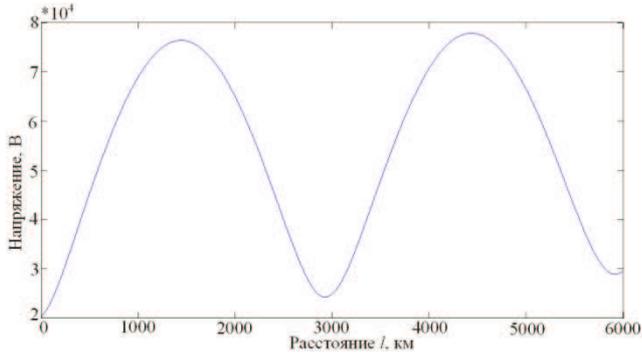
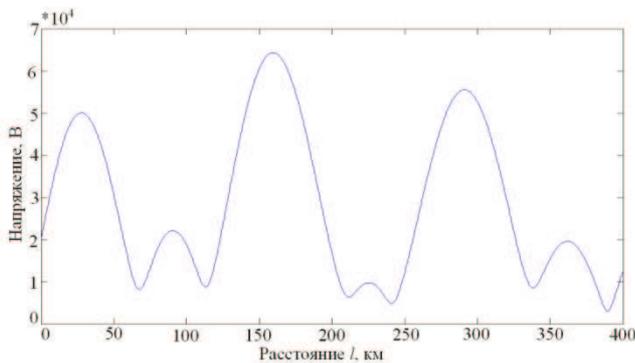


Рис. 1. Расчетная электрическая схема замещения элементарного участка однородной трехфазной двухцепной ЛЭП на частоте  $n$ -ой гармонической составляющей.



**Рис. 2.** Распределение напряжения прямой последовательности на частоте 50 Гц для одноцепной ЛЭП.

По формуле 3 был произведен расчет напряжения прямой последовательности, где  $\dot{U} = 20207 \cdot e^{j0}$  и  $\dot{I} = 100 \cdot e^{-j10}$ , на частоте 50 Гц для двухцепной ЛЭП. По полученным результатам была построена графическая зависимость напряжения от расстояния, представленная на рис. 2.



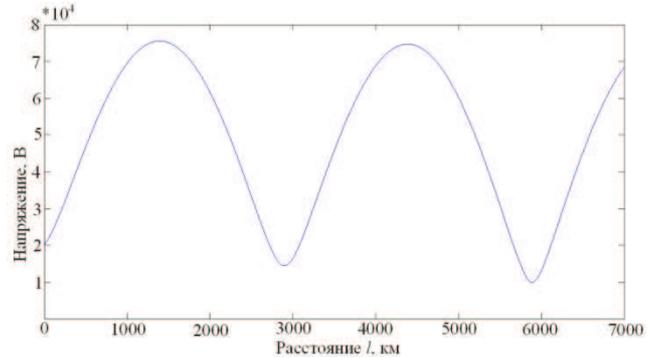
**Рис. 3.** Распределение напряжения на частоте 50 Гц для двухцепной ЛЭП.

Из рис. 3 видно, что длина волны в данном случае составляет 270 км. Максимальный экстремум напряжения наблюдается при расстоянии равном 160 км, и напряжение равно 62000 В. Минимальный экстремум наблюдается при расстоянии 70 км и напряжение равно 8000 В.

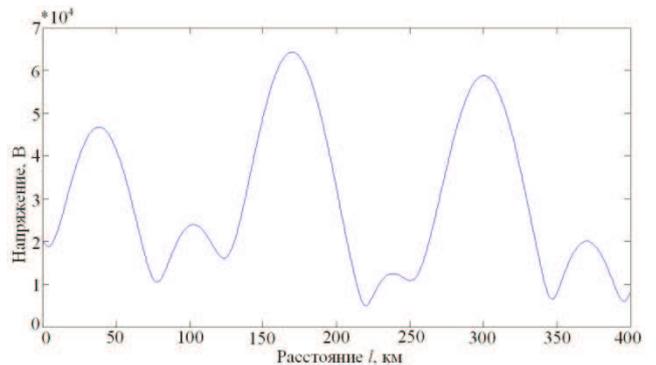
По формуле 3 был произведен расчет напряжения прямой последовательности, где  $\dot{U} = 20207 \cdot e^{j0}$  и  $\dot{I} = 100 \cdot e^{-j20}$ , на частоте 50 Гц для одноцепной ЛЭП. По полученным результатам была построена графическая зависимость напряжения от расстояния, представленная на рис. 3.

Из рис. 4 видно, что длина волны в данном случае составляет 5800 км. Максимальный экстремум напряжения наблюдается при расстоянии равном 1500 км, и напряжение равно 75000 В. Минимальный экстремум наблюдается при расстоянии 3000 км и напряжение равно 20000 В. Данный график также иллюстрирует длину волны однопроводной ЛЭП равной 6000 км.

По формуле 3 был произведен расчет напряжения прямой последовательности, где  $\dot{U} = 20207 \cdot e^{j0}$  и  $\dot{I} = 100 \cdot e^{-j20}$ , на частоте 50 Гц для двухцепной ЛЭП. По полученным результатам была построена графическая зависимость напряжения от расстояния, представленная на рис. 4.



**Рис. 4.** Распределение напряжения на частоте 50 Гц для одноцепной ЛЭП.



**Рис. 5.** Распределение напряжения на частоте 50 Гц для двухцепной ЛЭП.

Из рис. 5 видно, что длина волны в данном случае составляет 280 км. Максимальный экстремум напряжения наблюдается при расстоянии равном 170 км и составляет 65000 В. Минимальный экстремум наблюдается при расстоянии 220 км и составляет 5000 В.

По формуле 3 был произведен расчет напряжения прямой последовательности, где  $\dot{U} = 20207 \cdot e^{j0}$  и  $\dot{I} = 100 \cdot e^{-j25}$ , на частоте 50 Гц для одноцепной ЛЭП. По полученным результатам была построена графическая зависимость напряжения от расстояния, представленная на рис. 5.

Из рис. 6 видно, что длина волны в данном случае составляет 6300 км. Максимальный экстремум напряжения наблюдается при расстоянии равном 1800 км и составляет 78000 В. Минимальный экстремум наблюдается при расстоянии 3100 км и составляет 6000 В.

По формуле 3 был произведен расчет напряжения прямой последовательности, где  $\dot{U} = 20207 \cdot e^{j0}$  и  $\dot{I} = 100 \cdot e^{-j25}$ , на частоте 50 Гц для двухцепной ЛЭП.

По полученным результатам была построена графическая зависимость напряжения от расстояния, представленная на рис. 6.

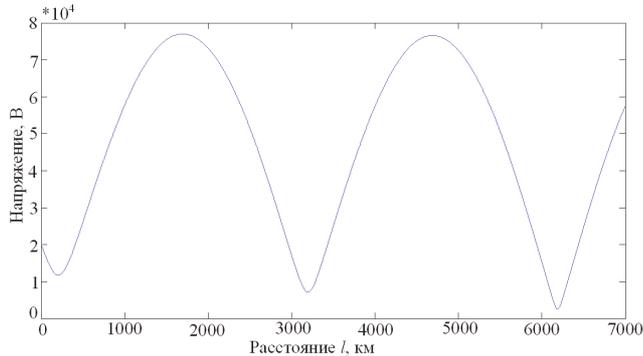


Рис. 6. Распределение напряжения на частоте 50 Гц для одноцепной ЛЭП

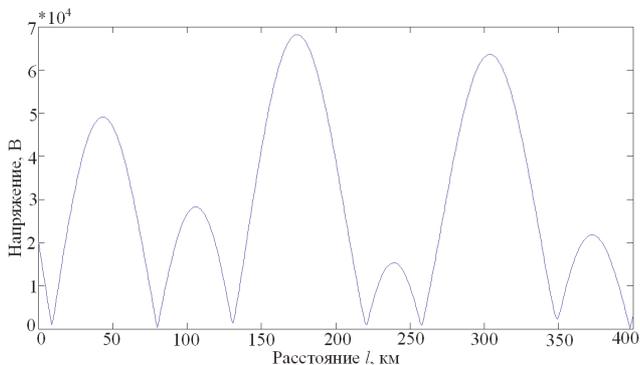


Рис. 7. Распространение напряжения на частоте 50 Гц для двухцепной ЛЭП

Из рис. 7 видно, что длина волны в данном случае составляет 210 км. Максимальный экстремум напряжения наблюдается при расстоянии равном 170 км и составляет 68000 В. Минимальный экстремум наблюдается при расстоянии 10 км, где напряжение практически отсутствует.

Данные графики были представлены для идеализированной модели.

#### Выводы

1. Построена схема замещения для однородного участка двухцепной ЛЭП;

2. Математическая модель, характеризующая изменение закона напряжения вдоль однородного участка шестипроводной ЛЭП, позволяет рассчитать распределение напряжения на частоте  $n$ -ой гармонической составляющей по двухцепной ЛЭП. Полученная математическая модель может быть использована в инженерных расчетах.

3. Длина волны зависит от параметров линии. Чем число линий больше, тем меньше длина волны, так как происходит наложение электромагнитных волн;

4. Для реальной ЛЭП необходимо разбивать ЛЭП на однородные участки и рассматривать их используя теорию многополюсников.

#### Литература

1. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Сайт: <http://www.docload.ru/Basesdoc/6/6806/index.htm>
2. Костенко М.В., Перельман Л.С., Шварин Л.С. Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях высокого напряжения. М.: Энергия, 1973. 272 с.
3. Плотников М.П. Особенности схемы замещения трехфазной двухцепной ЛЭП пониженного качества электрической энергии. Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири: материалы XI (XXXIII) всерос. науч.-техн. конф. Братск: Изд-во БрГУ, 2012. С. 97-98.
4. Арриллага Дж. Гармоники в электрических системах / пер. с англ. Дж. Арриллага, Д. Брэдли, П. Боджер. М.: Энергоатомиздат, 1990. 320 с.
5. Болшанин Г.А. Распределение электрической энергии пониженного качества по участкам электроэнергетических систем: в 2 кн. Братск: БрГУ, 2006. Т. 2. 807 с.

#### References

1. GOST 13109-97. Standards of quality of electric energy in systems of power supply of the general appointment. Site: <http://www.docload.ru/Basesdoc/6/6806/index.htm>
2. Kostenko, M of Century, Wave processes and electric hindrances in multiwire lines high voltage. Perelman, Yu.P.Shvarin. – M: Energy, 1973. – 272c.
3. Plotnikov, M. P., Feature of an equivalent circuit of three-phase two-chain LEP of the lowered quality of electric energy. Natural and engineering sciences – to development of regions of Siberia: materials XI (XXXIII) of the All-Russia scientific and technical conference. – Bratsk: BRGU publishing house, 2012. – page 97-98.
4. Arrillaga, J. Harmonics in electric systems / Lanes. With English/J. Arrillaga, D. Bradley, P. Bodzher. – M: Energoatomizdat, 1990. – 320 pages.
5. Bolshanin. And., Distribution of electric energy of the lowered quality on sites of elektroenergetichesky systems: in 2 books – Bratsk: BRGU, 2006. – 807 pages.