

АНАЛИЗ ИНТЕРВАЛОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Фурсанов М.И., Дуль* И.И.

Введение

В практике проектирования, при согласовании выполненной работы, часто возникает необходимость рассмотреть и учесть дополнительные режимы сети с некоторым изменением значений исходных данных.

Данные требования выдвигаются согласующей стороной по разным причинам, однако в статье авторами предлагается методика позволяющая учесть основные отклонения исходных данных уже на первом этапе расчетов, и получить результат в виде области-интервала возможных значений.

Как показано ниже наиболее сложным элементом предлагаемой методики является метод расчета интервала сопротивления воздушных линий электропередач. Метод расчета используемый сегодня на практике является недостаточно точным. Таким образом, основное внимание в статье отведено методу расчета интервала сопротивления воздушных линий электропередачи.

1. Сопротивление сети как влияющий фактор

Проанализируем интервал полного тока \underline{I}_{jk} на участке сети $j-k$. Понятно, что искомая область зависит от вариации значений исходных данных. Характер названной зависимости проиллюстрирован на примере упрощенной модели элемента электрической сети (рис. 1), где j, k – начало и конец элемента сети; \underline{I} – токи в элементах; \underline{U} – напряжение в узлах; \underline{Z} – полное сопротивление элемента сети.

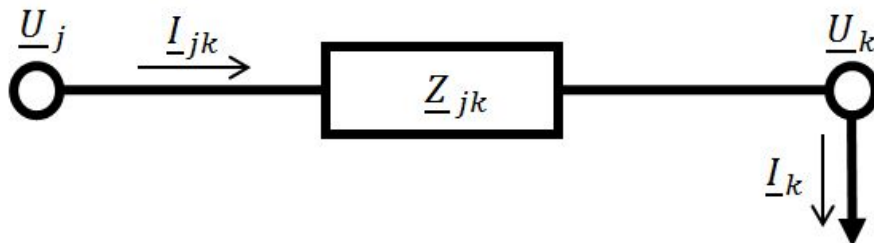


Рис. 1 – Упрощенная модель элемента электрической сети.

Интервал значений тока \underline{I}_{jk} может быть описан следующим образом:

$$\underline{I}_{jk} = (\underline{I}_{jk}^{min} .. \underline{I}_{jk}^{max}) = (\underline{I}_k^{min} .. \underline{I}_k^{max}), \quad (1)$$

где

* РУП «Белэнергосетьпроект», Минск, Беларусь, IvanDul88@gmail.com

$$\begin{aligned} \underline{I}_k &= f(\underline{U}_k, \underline{S}_k); \\ \underline{U}_k &= f(\underline{U}_j, \underline{I}_{jk}, \underline{Z}_{jk}), \end{aligned} \quad (2)$$

где

- \underline{S}_k – полная мощность нагрузки.

Из формул (1, 2) видно, что интервал значений \underline{I}_{jk} зависит от значений влияющих ключевых параметров:

- от напряжения питающего узла (\underline{U}_j) – на практике это известная величина;
- от нагрузки (\underline{S}_k) – существует множество исследований по прогнозированию величины нагрузки [1];
- от полного сопротивления (\underline{Z}_{jk}) – данный параметр в большинстве случаев определяется простыми методами.

Из перечисленного следует, для полноценного решения рассматриваемой задачи необходимо с высокой точностью определить сопротивление элемента сети, либо оценить интервал его значений. Ниже предложена методика по оценке интервала значений сопротивления воздушных линий электропередачи.

2. Определение сопротивлений воздушных линий

В ранних работах при расчете сети было принято учитывать только реактивное сопротивление линий, например для сети 110 кВ удельное сопротивление принималось равным среднему значению 0,4 Ом/км.

По мере развития вычислительных возможностей в 1980-2000 гг. наиболее эффективным методом расчета режима стал метод симметричных составляющих [2]. Формула (3) для расчета сопротивления прямой последовательности воздушных линий стала наиболее распространенной [3]:

$$\underline{Z}_1 = r_{\pi} + i \cdot 0,145 \cdot \lg \frac{D_{\text{cp}}}{\rho_{\text{э.п}}}, \quad (3)$$

Более подробное описание формулы (3) с пояснением расчета прямой обратной и нулевой составляющих сопротивления приведено в руководящих указаниях [4]. Данный документ применяется на практике при выполнении расчетов установившихся режимов и режимов короткого замыкания. Формулы из указаний [4] для расчета сопротивлений одноцепной линии приведены ниже (для наглядности в формулах грозотрос не учитывается):

$$\begin{aligned} \underline{Z}_2 &= \underline{Z}_1; \\ \underline{Z}_0 &= r_{\pi} + 0,15 + i \cdot 0,435 \cdot \lg \frac{D_3}{\sqrt[3]{\rho_{\text{э.п}} \cdot D_{\text{cp}}^2}}, \end{aligned} \quad (4)$$

Кроме того, в указаниях [4] приводится упрощенная формула учета сопротивления земли:

$$D_3 = \frac{66,4}{\sqrt{f \cdot \rho_3}}, \quad (6)$$

где

- D_3 – эквивалентная глубина расположения обратного провода в земле, м;
- f – частота переменного тока, Гц;
- $\rho_3 = 1/\sigma_3$ – удельное электрическое сопротивление земли, Ом·м.

Формула (3) позволяет определить параметр \underline{Z}_1 с точностью, достаточной для расчетов установившихся режимов, принимая во внимание неопределенность значений электрической нагрузки. Однако, при решении задачи интервальным методом, необходим более точный метод расчета сопротивлений.

В отличие от установившихся режимов сетей, задачи расчета режима короткого замыкания и электромеханических переходных процессов выглядят несколько иным образом. При выполнении данных задач применяются формулы (3) и (4) [4], при этом в случае проверки работоспособности сети и выбора оборудования, допустимой считается погрешность расчета равная 10%, так как, расчет выполняется на модели сети с учетом её перспективного развития. Однако, опыт проектирования показал, что в каждом 10-м проекте возникает необходимость более точного расчета. В случае выбора уставок срабатывания релейной защиты и противоаварийной автоматики неточность расчетов нивелируется с помощью коэффициентов отстройки, надежности и чувствительности. В этом случае, более точные методы расчета позволят существенно уменьшить данные коэффициенты и повысить надежность работы сети.

Расчет электромагнитных переходных процессов являются отдельным классом задач. Для таких задач необходимая точность расчета электрических параметров сети определяется в зависимости от поставленной цели. В большинстве случаев расчет параметров выполняется максимально точно [5-8], однако всегда имеется некоторая неопределенность исходных данных.

Отметим, что результаты расчета собственных и взаимных сопротивлений для воздушной линии (которые учитывают формулы (3) и (4)) имеют следующие оценки погрешности. Согласно [5] результат расчета внутреннего сопротивления провода имеет погрешность до 10% по мнимой составляющей и 7% по вещественной составляющей. Результат расчета взаимного сопротивления проводов имеет погрешность до 6% по мнимой и вещественной составляющим [5].

3. Точный метод для расчета сопротивлений воздушных линий

Для наглядности, в статье тезисно приведены основные допущения, принятые при рассмотрении точного метода расчета сопротивлений элементов сети.

Математическая форма записи свойств электромагнитного поля

представлена системой дифференциальных уравнений Максвелла, которая для международной системы единиц измерения «СИ» представляется следующим образом [9]:

$$\begin{cases} \operatorname{div}(D) = \rho_{\text{св}}; \\ \operatorname{div}(B) = 0; \\ \operatorname{rot}(E) = -\frac{\partial B}{\partial t}; \\ \operatorname{rot}(H) = j + \frac{\partial D}{\partial t}, \end{cases} \quad (7)$$

где

- D – электрическая индукция, Кл/м²;
- $\rho_{\text{св}}$ – объемная плотность свободных электрических зарядов, Кл/м;
- B – магнитная индукция, Тл;
- E – напряженность электрического поля, В/м;
- H – напряженность магнитного поля, А/м;
- j – плотность электрического тока, А/м²;
- t – момент (координата) времени, с.

Электрическая индукция D для изотропной однородной среды может быть определена через напряженность электрического поля следующим образом:

$$D = \varepsilon_r \varepsilon_0 \cdot E, \quad (8)$$

где

- ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость, которая для рассматриваемой среды является константой;
- $\varepsilon_0 \approx 8,85 \cdot 10^{-12}$ – электрическая постоянная, Ф/м.

Магнитная индукция для изотропной однородной среды связана с напряженностью магнитного поля:

$$B = \mu_r \mu_0 \cdot H, \quad (9)$$

где

- μ_r – относительная магнитная проницаемость, которая для рассматриваемой среды является константой;
- $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – магнитная постоянная, Гн/м.

Электрическая плотность тока j в проводящей изотропной среде обусловлена движением свободных электрических зарядов $\rho_{\text{св}}$ в следствии наличия электрического поля E :

$$j = \rho_{\text{св}} \vartheta_p + \sigma E, \quad (10)$$

где

- ϑ_p – скорость перемещения свободных зарядов, м/с;
- σ – удельная электрическая проводимость, См/м.

В целях упрощения решения системы уравнений (7) применяют разложение электрической (E) и магнитной (B) составляющих поля в гармонический ряд Фурье:

$$E = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \underline{E}_k e^{i\omega_k t};$$

$$B = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \underline{B}_k e^{i\omega_k t},$$
(11)

где

- $\underline{E}_k, \underline{B}_k$ – амплитудные значения электрической и магнитной составляющих для i -й гармоники;
- i – мнимая единица, $i^2 = -1$;
- ω_k – угловая скорость вращения составляющих поля, $\omega_k = 2\pi f_k$;
- $f_k = \frac{k}{T}$ – частота электромагнитного поля гармонической составляющей k на моделируемом интервале T , Гц.

С учетом (11) система дифференциальных уравнений для i -й гармоники (7) примет вид (далее в формулах индекс k опущен):

$$\frac{\partial^2 \underline{E}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \underline{E}}{\partial z^2} + \underline{m}^2 \cdot \underline{E} = 0,$$
(12)

где

- $\underline{m}^2 = \mu\varepsilon \cdot \omega^2 + \underline{\gamma}^2$ – приведенное волновое число среды.

Видно, что дифференциальное уравнение (12) описывает свойства электрической составляющей поля для рассматриваемой гармоники в проводниках с учетом следующих условий:

- среда распространения электромагнитного поля является изотропной и однородной, при этом $\varepsilon_r = const, \mu_r = const$.
- среда может иметь проводимость;
- влияние неравномерного распределения и ускоренного движения свободных зарядов пренебрежимо мало;
- излучение проводником электромагнитной волны пренебрежимо мало.

4. Модель проводника

Дифференциальное уравнение вида (12) называется волновым уравнением и достаточно глубоко исследовано в математической физике такими учеными как Пуассон, Парсеваль, Д'Аламбер, Киргоф и др. Применительно к электроэнергетике, наибольшее распространение получило решение дифференциального уравнения (12) предложенное Карсоном [10]. Карсон показал, что решение волнового уравнения для распространения электромагнитного поля вдоль группы проводов (воздушной линии) может быть описано законом Ома:

$$\underline{U} = \underline{I} \cdot \underline{Z},$$
(13)

где

- \underline{U} – матрица столбец напряжений на проводах линии, В/м;
- \underline{I} – матрица столбец токов по проводам линии, А;
- \underline{Z} – результирующая матрица собственных и взаимных сопротивлений проводов линии, Ом/м.

Как показано в [5], матрица сопротивлений для группы параллельных проводов (воздушной линии электропередачи) может быть представлена в следующем виде:

$$\underline{Z} = \underline{Z}_{jj} + \underline{Z}_{jk} + i\omega M_{jk}, \quad (14)$$

где

- \underline{Z}_{jj} – матрица собственных сопротивлений проводов линии, обусловленных внутренним сопротивлением, Ом/м;
- \underline{Z}_{jk} – матрица собственных и взаимных сопротивлений проводов линии обусловленных проводимостью земли, Ом/м;
- $i\omega M_{jk}$ – матрица собственных и взаимных сопротивлений проводов линии обусловленных расположением проводов, Ом/м.

Наиболее точное решение для матрицы собственных сопротивлений проводов (\underline{Z}_{jj}) предложено в [5, 10, 11]:

$$\underline{Z}_{jj} = s_j^n \eta_j^n \cdot \frac{\underline{m}_j^n \rho_j^n}{2\pi r_j^n} \cdot \frac{I_0(\underline{m}_j^n r_j^n)}{I_1(\underline{m}_j^n r_j^n)}, \quad (15)$$

где

- \underline{Z}_{jj} – собственное сопротивление провода, Ом/м;
- s_j^n – коэффициент, учитывающий конструкцию провода;
- η_j^n – коэффициент, учитывающий расщепление провода;
- \underline{m}_j^n – приведенное волновое число;
- r_j^n – радиус провода, м;
- ρ_j^n – удельное электрическое сопротивление провода, Ом·м;
- $I_0(\underline{m}_j^n r_j^n)$, $I_1(\underline{m}_j^n r_j^n)$ – функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядка от аргумента $\underline{m}_j^n r_j^n$;
- $\underline{m}_j^n = \sqrt{\frac{i\omega\mu}{\rho_j^n}}$ – приведенное волновое число среды.

Оценим интервал значений для элементов матрицы собственных сопротивлений проводов (\underline{Z}_{jj}). Примем, что наибольшее влияние на \underline{Z}_{jj} оказывают такие аргументы, как r_j^n и ρ_j^n . С помощью численных методов построим области всех возможных значений \underline{Z}_{jj} на комплексной плоскости. Данная область в рассматриваемых интервалах аргументов представляет собой геометрическую поверхность.

Графический анализ функции $\underline{Z}_{jj}(r_j^n, \rho_j^n)$ выявил, что она является возрастающей функцией действительных и мнимых значений на рассмотренных интервалах значений аргументов. Найденные поверхности действительных и мнимых значений \underline{Z}_{jj} не имеют экстремумов при значениях

аргументов внутри рассмотренных интервалов.

Наиболее точное решение для матрицы собственных и взаимных сопротивлений проводов линии обусловленных проводимостью земли приведено в [5, 10, 11]:

$$\underline{Z}_{jk} = \frac{i\omega\mu}{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{2e^{-\lambda(h_j+h_k)} \cos\lambda b_{jk}}{\lambda + \sqrt{\lambda + \frac{i\omega\mu}{\rho_3}}} d\lambda, \quad (16)$$

где

- h_j, h_k – расстояние от проводов j и k до поверхности земли, м (смотрите [5, 10, 11]);
- λ – произвольная переменная;
- b_{jk} – расстояние по горизонтали от провода j до провода k , м;
- $\rho_3 = 1/\sigma_3$ – удельное электрическое сопротивление земли, Ом·м.

Интеграл (16) называют интегралом Карсона [4, 10].

Оценим интервал значений для элементов матрицы собственных и взаимных сопротивлений проводов линии обусловленных проводимостью земли.

Допустим, что \underline{Z}_{jk} завит от $h_{jk} = h_j + h_k, b_{jk}$ и ρ_3 . С помощью численных методов построим области всех возможных значений интеграла Карсона.

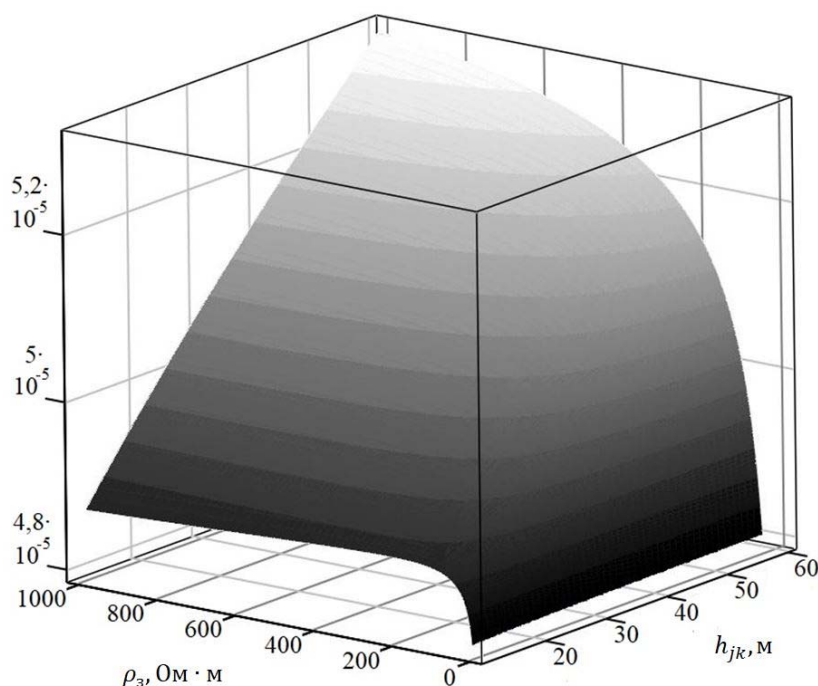


Рис. 2 – Поверхность действительных значений интеграла Карсона при вариации аргументов ($h_{jk} = h_j + h_k; \rho_3$).

Анализ функции $\underline{Z}_{jk}(h_{jk}, b_{jk}, \rho_3)$ графическим методом показал, что у интеграла Карсона нет экстремумов в середине рассматриваемых интер-

валов аргументов (h_{jk}, b_{jk}, ρ_3) . Одна из построенных поверхностей значений интеграла Карсона приведена на рисунке 2.

Графический анализ показал, что на рассмотренных интервалах аргументов интеграл Карсона ($\underline{Z}_{jk}(h_{jk}, b_{jk}, \rho_3)$) является:

- возрастающей функцией действительных значений и убывающей функцией мнимых значений по аргументу $h_{jk} = h_j + h_k$;
- возрастающей функцией действительных и мнимых значений по аргументу ρ_3 ;
- по аргументу b_{jk} интеграл Карсона практически неизменен.

Матрица непосредственных взаимных сопротивлений проводов ($i\omega M_{jk}$) линии выражается как [5-7, 11]:

$$i\omega M_{jk} = \frac{i\omega\mu}{2\pi} \ln \frac{D_{jk}}{d_{jk}}, \quad (17)$$

где

- D_{jk} – расстояние от провода j до зеркального отображения провода k от поверхности земли, м;
- d_{jk} – расстояние от провода j до провода k , м.

Оценим интервал значений для элементов матрицы взаимных сопротивлений проводов ($i\omega M_{jk}$).

Очевидно, что влияние на $i\omega M_{jk}$ оказывают такие аргументы как D_{jk} и d_{jk} . В результате анализа установлено, что на рассмотренных интервалах аргументов функция $i\omega M_{jk}(D_{jk}, d_{jk})$ является:

- возрастающей по аргументу D_{jk} ;
- убывающей по аргументу d_{jk} .

Таким образом, матрица сопротивлений для группы параллельных проводов является функцией вида $\underline{Z}(r_j^{\Pi}, \rho_j^{\Pi}, \rho_3, h_{jk}, b_{jk}, D_{jk}, d_{jk})$, у которой максимальные и минимальные значения могут быть определены при расчете только граничных значений аргументов.

5. Пример расчета для элемента электрической сети

Ниже приведены результаты расчета для одноцепной ВЛ 110 кВ с проводом АС 240/32. Матрица собственных и взаимных сопротивлений имеет следующий вид (для упрощения грозотрос не приведен):

$$\underline{Z}^{min} = \begin{bmatrix} & \text{фаза } A & \text{фаза } B & \text{фаза } C \\ \text{фаза } A & 0,158 + 0,689i & 0,043 + 0,262i & 0,043 + 0,271i \\ \text{фаза } B & 0,043 + 0,262i & 0,157 + 0,690i & 0,043 + 0,271i \\ \text{фаза } C & 0,043 + 0,271i & 0,043 + 0,271i & 0,158 + 0,689i \end{bmatrix}; \quad (18)$$

$$\underline{Z}^{max} = \begin{bmatrix} & \text{фаза } A & \text{фаза } B & \text{фаза } C \\ \text{фаза } A & 0,182 + 0,811i & 0,049 + 0,401i & 0,049 + 0,395i \\ \text{фаза } B & 0,049 + 0,401i & 0,182 + 0,811i & 0,049 + 0,426i \\ \text{фаза } C & 0,049 + 0,395i & 0,049 + 0,426i & 0,182 + 0,811i \end{bmatrix}.$$

Расчет матрицы собственных и взаимных сопротивлений выполнен с учетом вариации следующих параметров линии электропередачи:

- геометрии линии (высота подвеса провода, длина траверс, длина гирлянды изоляторов, стрела провеса провода, диаметр провода);
- сопротивления проводов;
- сопротивления земли.

Для метода симметричных составляющих [2], согласно которому, сопротивление линии учитывается в расчетах как совокупность составляющих прямой, обратной и нулевой последовательности, составляющие матрицы \underline{Z} примут следующие значения:

$$\begin{aligned}\underline{Z}_1 &= \underline{Z}_2 = (0,115..0,133) + (0,403..0,427)i; \\ \underline{Z}_0 &= (0,243..0,280) + (1,231..1,625)i,\end{aligned}\tag{19}$$

где

- \underline{Z}_1 – сопротивление для тока прямой последовательности, Ом/м;
- \underline{Z}_2 – сопротивление для тока обратной последовательности, Ом/м;
- \underline{Z}_0 – сопротивление для тока нулевой последовательности.

Применим полученные результаты для оценки установившегося режима элемента сети (рис. 1), с учетом следующих исходных данных:

$$\begin{aligned}\underline{U}_j &= 115 \text{ кВ}; \\ \underline{S}_k &= (20..25) + (10..15)i \text{ МВ} \cdot \text{А}; \\ L_{jk} &= 30 \text{ км},\end{aligned}\tag{20}$$

где

- \underline{S}_k – нагрузка узла, МВ·А;
- L_{jk} – протяженность линии, км.

Тогда искомые интервалы амплитуды тока \underline{I}_{jk} и напряжения \underline{U}_k будут равны:

$$\begin{aligned}\underline{I}_{jk} &= (113,9..149,7) \text{ А}; \\ \underline{U}_k &= (112,5..113,4) \text{ кВ}.\end{aligned}\tag{21}$$

Также для примера выполнен расчет режима короткого замыкания, для наглядности посчитаем трехфазное замыкание, при условиях аналогичных (20).

Амплитуда периодической составляющей тока трехфазного короткого замыкания $\underline{I}_{jk}^{(3)}$ будет равна следующему интервалу:

$$\underline{I}_{K3\ jk}^{(3)} = (4,95..5,28) \text{ кА}.\tag{22}$$

Заключение

Основное внимание в статье отведено методике расчета интервала сопротивления воздушных линий электропередачи.

Предложенная методика позволяет учесть все возможные вариации исходных данных при расчете параметров сети.

Приведенная методика предназначена для более качественного анализа режимов сети и повышения надежности энергосистем.

Литература

1. Прогнозирование электрических нагрузок при оперативном управлении электроэнергетическими системами на основе нейронных структур / Г.П. Шумилова, Н.Э. Готман, Т.Б. Старцева – Екатеринбург: УрО РАН, 2008. – 88 с.

2. Вагнер К.Ф. Метод симметричных составляющих в применении к анализу несимметричных электрических цепей: учеб. пособие / К.Ф. Вагнер, Р.Д. Эванс; пер. с англ. Л.Е. и М.Е. Сыркиных; под ред. Д.А. Городского – Л; М: ОНТИ НКТП СССР, 1936. – 407 с.

3. Герасименко А.А. Передача и распределение электрической энергии: учеб. пособие / А.А. Герасименко, В.Т. Федин – Ростов н.Д.: Феникс, 2008. – 715 с.

4. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 11. Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110-750 кВ. – М.: Энергия, 1979. – 152 с.

5. Перенапряжения и защита от них в воздушных и кабельных электропередачах высокого напряжения / М.В. Костенко [и др.] – Л: Наука, 1988. – 302 с.

6. Глушко В.И. К решению классической задачи магнитного влияния воздушных линий электропередачи на протяженные проводящие коммуникации / В.И. Глушко // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2013. – №2. – С. 5-10.

7. Глушко В.И. Методы расчета магнитного влияния между электрическими цепями с учетом конечной проводимости земли / В.И. Глушко // Электричество. – 1986. – № 3. – С. 6-13.

8. EMTP Theory book. Bonneville Power Administration, Branch of System Engineering. Portland, Oregon 97208-3621, United States of America (www.emtp.org).

9. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: учеб. пособие / Л.А. Бессонов. – М: Высшая школа, 1996. – 638 с.

10. J.R. Carson. Wave propagation in overhead wires with ground return // BSTJ. – 1926. – Vol. 5. №4. – P. 31-37.

11. Костенко М.В. Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях высокого напряжения / М.В. Костенко, Л.С. Перельман, Ю.П. Шкарин. – М: Энергия, 1973. – 272 с.