

АМПЛИТУДНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ПАДАЮЩЕЙ И ОТРАЖЕННОЙ ВОЛН В ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ТРЕХПРОВОДНОГО ИСПОЛНЕНИЯ

Г.А. Большанин

Братский государственный университет, г. Братск, Россия

Передача электрической энергии по линиям электропередачи (ЛЭП) обеспечивается волнами электромагнитного поля. По ЛЭП трехпроводного исполнения передача электрической энергии обеспечивается тремя парами волн электромагнитного поля: тремя падающими и тремя отраженными. Амплитуды этих волн определяют величины напряжений и токов в линиях электропередачи. Сформирована схема распределения амплитудных значений падающих и отраженных волн электромагнитного поля по линейному проводу однородного участка ЛЭП трехпроводного исполнения. Она свидетельствует о том, что величины амплитудных значений волн электромагнитного поля определяют постоянные интегрирования. По схеме распределения амплитудных значений волн электромагнитного поля по линейному проводу ЛЭП трехпроводного исполнения видно, что на величины напряжений и токов в этом проводе существенное влияние оказывают соседние токоведущие части. Эта схема дает реальную возможность определения численных значений постоянных интегрирования. С помощью этих величин при известных постоянных распространения электромагнитных волн по линейным проводам ЛЭП и соответствующих волновых сопротивлений можно получить представление об амплитудных значениях падающих и отраженных волн вдоль всей линии электропередачи. Результаты описываемого здесь исследования могут быть использованы на стадии проектирования, реконструкции и эксплуатации ЛЭП трехпроводного исполнения для прогнозирования напряжений и токов на различных участках линии электропередачи. Прогнозирование амплитудных значений падающих и отраженных волн электромагнитного поля в линейных проводах двухцепной ЛЭП позволит детально проанализировать напряжения и токи на однородном участке линии электропередачи. Применение предлагаемой методики возможно и в условиях пониженного качества электрической энергии.

Ключевые слова: линия электропередачи, падающая волна, отраженная волна, постоянные интегрирования, качество электрической энергии, напряжение, ток.

Введение

Транспортировка электрической энергии напряжением 35 кВ и выше до отдаленного потребителя часто выполняется линиями электропередачи (ЛЭП) трехпроводного исполнения. Монтажу, наладке и эксплуатации ЛЭП, как правило, предшествует прогнозирование результатов передачи электрической энергии. Результаты прогнозирования используются при планировании режимов и оперативном управлении, электроснабжения промышленных и иных объектов. При этом трехфазные кабельные линии и сравнительно непротяженные воздушные линии напряжением до 35 кВ в расчетах обычно принимают за линии с сосредоточенными параметрами [1]. Однако в ЛЭП протяженностью свыше 200–400 км заметно проявляется волновой характер распространения электрической энергии в проводящей среде и такие линии электропередачи приходится принимать за линии с распределенными параметрами [2, 3]. А при плохом качестве электрической энергии протяженность ЛЭП, при которой приходится учитывать волновые процессы передачи электрической энергии, уменьшается [4].

Методика исследования

Передача электрической энергии обеспечивается волнами электромагнитного поля. Этот

факт является следствием того, что электричество есть результат действия электромагнитного поля.

Токоведущие части неперегруженных ЛЭП можно считать линейной средой. В таком случае получается, что электромагнитное поле распространяется в линейной среде. А такое распространение, как известно из курса физики, выполняется по гармоническим законам [5].

Традиционно анализ результатов транспортировки электрической энергии по ЛЭП выполняется для одного провода, а затем распространяется на остальные провода ЛЭП простым умножением на соответствующий коэффициент. При этом полностью игнорируются электромагнитные связи между токоведущими частями ЛЭП [6, 7]. Это справедливо только при условии практически идеального качества электрической энергии.

Передача электрической энергии по ЛЭП трехпроводного исполнения обеспечивается тремя парами волн электромагнитного поля: тремя падающими и тремя отраженными [8]. Этот факт подтверждается уравнениями распределения фазных напряжений и линейных токов по однородному участку трехпроводной ЛЭП [4]:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_A &= \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \left(A_{A(2i-1)} e^{\gamma_i l} + A_{A2i} e^{-\gamma_i l} \right); \\ \dot{U}_B &= \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \left(A_{B(2i-1)} e^{\gamma_i l} + A_{B2i} e^{-\gamma_i l} \right); \\ \dot{U}_C &= \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \left(A_{C(2i-1)} e^{\gamma_i l} + A_{C2i} e^{-\gamma_i l} \right); \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\dot{I}_A = \frac{1}{3} \left[\sum_{i=1}^3 \left(\frac{A_{A2i} e^{-\gamma_i l}}{\underline{Z}_{cAi}} - \frac{A_{A(2i-1)} e^{\gamma_i l}}{\underline{Z}_{cAi}} + \frac{A_{B2i} e^{-\gamma_i l}}{\underline{Z}_{cABi}} - \frac{A_{B(2i-1)} e^{\gamma_i l}}{\underline{Z}_{cABi}} + \frac{A_{C2i} e^{-\gamma_i l}}{\underline{Z}_{cCAi}} - \frac{A_{C(2i-1)} e^{\gamma_i l}}{\underline{Z}_{cCAi}} \right) \right]; \quad (2)$$

$$\dot{I}_B = \frac{1}{3} \left[\sum_{i=1}^3 \left(\frac{A_{B2i} e^{-\gamma_i l}}{\underline{Z}_{cBi}} - \frac{A_{B(2i-1)} e^{\gamma_i l}}{\underline{Z}_{cBi}} + \frac{A_{A2i} e^{-\gamma_i l}}{\underline{Z}_{cABi}} - \frac{A_{A(2i-1)} e^{\gamma_i l}}{\underline{Z}_{cABi}} + \frac{A_{C2i} e^{-\gamma_i l}}{\underline{Z}_{cBCi}} - \frac{A_{C(2i-1)} e^{\gamma_i l}}{\underline{Z}_{cBCi}} \right) \right]; \quad (3)$$

$$\dot{I}_C = \frac{1}{3} \left[\sum_{i=1}^3 \left(\frac{A_{C2i} e^{-\gamma_i l}}{\underline{Z}_{cCi}} - \frac{A_{C(2i-1)} e^{\gamma_i l}}{\underline{Z}_{cCi}} + \frac{A_{A2i} e^{-\gamma_i l}}{\underline{Z}_{cCAi}} - \frac{A_{A(2i-1)} e^{\gamma_i l}}{\underline{Z}_{cCAi}} + \frac{A_{B2i} e^{-\gamma_i l}}{\underline{Z}_{cBCi}} - \frac{A_{B(2i-1)} e^{\gamma_i l}}{\underline{Z}_{cBCi}} \right) \right]; \quad (4)$$

где A_{A2i} и $A_{A(2i-1)}$, A_{B2i} и $A_{B(2i-1)}$, A_{C2i} и $A_{C(2i-1)}$ – пофазные постоянные интегрирования, характеризующие отраженные и падающие волны i -й пары волн электромагнитного поля; γ_i – постоянная распространения i -й пары волн электромагнитного поля; \underline{Z}_{cAi} , \underline{Z}_{cBi} и \underline{Z}_{cCi} – собственные волновые сопротивления линейных проводов A , B и C i -й паре волн электромагнитного поля; \underline{Z}_{cABi} , \underline{Z}_{cBCi} и \underline{Z}_{cCAi} – взаимные волновые сопротивления между линейными проводами i -й паре волн электромагнитного поля; l – расстояние от начала рассматриваемого участка ЛЭП до места на линии электропередачи, где нужно выяснить численные значения напряжений \dot{U}_A , \dot{U}_B , \dot{U}_C и токов \dot{I}_A , \dot{I}_B , \dot{I}_C .

Для начала анализируемого участка ЛЭП, когда $l = 0$, уравнения (1)–(4) переписуются так:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{A1} &= \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \left(A_{A(2i-1)} + A_{A2i} \right); \\ \dot{U}_{B1} &= \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \left(A_{B(2i-1)} + A_{B2i} \right); \\ \dot{U}_C &= \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \left(A_{C(2i-1)} + A_{C2i} \right); \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\dot{I}_{A1} = \frac{1}{3} \left[\sum_{i=1}^3 \left(\frac{A_{A2i} - A_{A(2i-1)}}{\underline{Z}_{cAi}} + \frac{A_{B2i} - A_{B(2i-1)}}{\underline{Z}_{cABi}} + \frac{A_{C2i} - A_{C(2i-1)}}{\underline{Z}_{cCAi}} \right) \right]; \quad (6)$$

$$\dot{I}_{B1} = \frac{1}{3} \left[\sum_{i=1}^3 \left(\frac{A_{B2i} - A_{B(2i-1)}}{\underline{Z}_{cBi}} + \frac{A_{A2i} - A_{A(2i-1)}}{\underline{Z}_{cABi}} + \frac{A_{C2i} - A_{C(2i-1)}}{\underline{Z}_{cBCi}} \right) \right]; \quad (7)$$

$$\dot{I}_C = \frac{1}{3} \left[\sum_{i=1}^3 \left(\frac{A_{C2i} - A_{C(2i-1)}}{\underline{Z}_{cCi}} + \frac{A_{A2i} - A_{A(2i-1)}}{\underline{Z}_{cCAi}} + \frac{A_{B2i} - A_{B(2i-1)}}{\underline{Z}_{cBCi}} \right) \right]. \quad (8)$$

Уравнения (2) и (6) позволяют построить схему распределения амплитудных значений одной пары волн электромагнитного поля по линейному проводу A однородного участка ЛЭП однопроводного исполнения (рис. 1). По этим уравнениям и по схеме видно, что в каждом линейном проводе однородного участка трехпроводной ЛЭП присутствует 6 волн электромагнитного поля: 2 собственные и 4 наведенных от каждого соседнего линейного провода исследуемой ЛЭП.

Амплитуды волн электромагнитного поля характеризуются постоянными интегрирования. Постоянные интегрирования A_{A1} , A_{A3} , A_{A5} , A_{B1} , A_{B3} , A_{B5} , A_{C1} , A_{C3} и A_{C5} несут ответственность за отраженные волны, а постоянная интегрирования A_{A2} , A_{A4} , A_{A6} , A_{B2} , A_{B4} , A_{B6} , A_{C2} , A_{C4} и A_{C6} – за падающие. Причем величины постоянных интегрирования, ответственных за падающие волны электромагнитного поля, преобладают над величинами постоянных интегрирования, ответственных за отраженные волны.

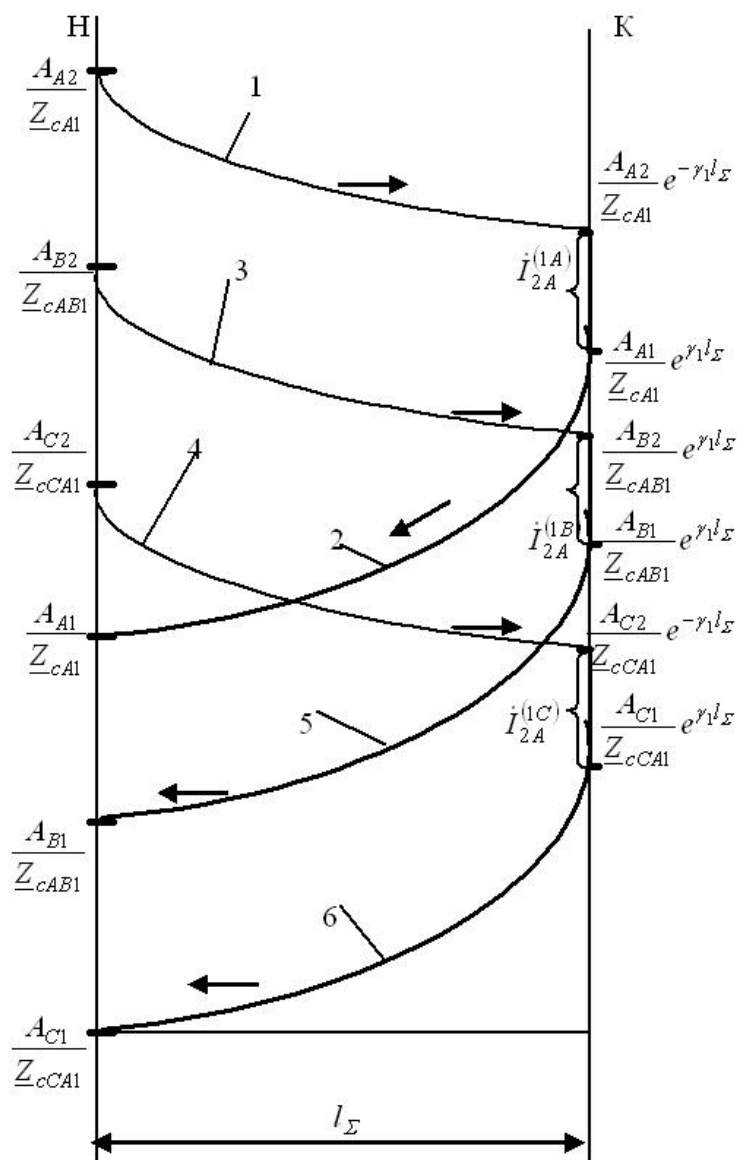


Рис. 1. Схема распределения амплитудных значений первой пары падающих и отраженных волн электромагнитного поля по линейному проводу А однородного участка трехфазной ЛЭП трехпроводного исполнения: 1 – собственная падающая волна; 2 – собственная отраженная волна; 3 – наведенная падающая волна от линейного провода В; 4 – наведенная отраженная волна от линейного провода В; 5 – наведенная падающая волна от линейного провода С; 6 – наведенная отраженная волна от линейного провода С; l_{Σ} – протяженность всего анализируемого участка ЛЭП

Для реализации уравнений (1)–(4) необходимы сведения о вторичных параметрах исследуемого однородного участка ЛЭП, а именно постоянных распространения волн электромагнитного поля по однородному участку, волновые сопротивления и постоянные интегрирования. Для определения вторичных параметров ЛЭП необходимо предварительно определить численные значения первичных параметров этого участка. Это можно сделать с помощью соответствующей справочной литературы [9, 10], аналитически [11–20] или экспериментально [20, 21]. И лишь после этого можно рассчитать постоянные распространения волн электромагнитного поля по токоведущим частям ЛЭП и соответствующие волновые сопротивления [4, 20].

Особое внимание следует обратить на методику определения численных значений постоянных интегрирования. Именно они совместно с постоянными распространения волн электромагнитного поля по линейным проводам ЛЭП и соответствующими волновыми сопротивлениями и определяют, судя по рис. 1, амплитудные значения падающих и отраженных волн. Эта методика определена для однородных участков ЛЭП элементарной (бесконечно малой) протяженности [4]. Но для анализа результатов передачи электрической энергии по ЛЭП конечной протяженности это не годится, поскольку в этом случае в многопроводных линиях электропередачи не учитывается электромагнитное воздействие линейных проводов друг на друга. Этот недостаток ликвидирован в [20]. Там представлена методика определения численных значений постоянных интегрирования с учетом электромагнитных связей между токоведущими частями ЛЭП. Такая методика применима для анализа передачи электрической энергии по ЛЭП конечной протяженности, но она очень громоздка. В предлагаемом исследовании предпринята попытка преодоления этого недостатка на основании схемы распределения волн электромагнитного поля по линейному проводу ЛЭП трехпроводного исполнения, изображенной на рис. 1.

Как известно, передача электрической энергии по каждому проводу однородного участка трехпроводного исполнения обеспечивается тремя парами волн электромагнитного поля. Для начала линейного провода A , судя по рис. 1, этот факт может быть представлен так:

$$\dot{I}_{1A} = \frac{1}{3} \left(\dot{I}_{1A}^{(1)} + \dot{I}_{1A}^{(2)} + \dot{I}_{1A}^{(3)} \right), \tag{9}$$

где $\dot{I}_{1A}^{(1)}$, $\dot{I}_{1A}^{(2)}$ и $\dot{I}_{1A}^{(3)}$ – доли тока в начале линии A от каждой пары волн электромагнитного поля.

Судя по уравнениям (2)–(4) и по схеме, изображенной на рис. 1, в каждом линейном проводе действуют токи от всех трех фаз от всех трех пар волн электромагнитного поля. Этот факт может быть обозначен следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{1A}^{(1)} &= \dot{I}_{1A}^{(1A)} + \dot{I}_{1A}^{(1B)} + \dot{I}_{1A}^{(1C)}; \\ \dot{I}_{1A}^{(2)} &= \dot{I}_{1A}^{(2A)} + \dot{I}_{1A}^{(2B)} + \dot{I}_{1A}^{(2C)}; \\ \dot{I}_{1A}^{(3)} &= \dot{I}_{1A}^{(3A)} + \dot{I}_{1A}^{(3B)} + \dot{I}_{1A}^{(3C)}; \end{aligned} \right\} \tag{10}$$

где $\dot{I}_{1A}^{(1A)}$, $\dot{I}_{1A}^{(2A)}$ и $\dot{I}_{1A}^{(3A)}$ – собственные токи в начале линейного провода A от первой, второй и третьей пар волн электромагнитного поля; $\dot{I}_{1A}^{(1B)}$, $\dot{I}_{1A}^{(2B)}$, $\dot{I}_{1A}^{(3B)}$ и $\dot{I}_{1A}^{(1C)}$, $\dot{I}_{1A}^{(2C)}$, $\dot{I}_{1A}^{(3C)}$ – токи в начале линейного провода A , наведенные от соседних проводов B и C от первой, второй и третьей пар волн электромагнитного поля.

Если уравнения (10) поместить в уравнение (9), то получится следующее:

$$\dot{I}_{1A} = \frac{1}{3} \left(\dot{I}_{1A}^{(1A)} + \dot{I}_{1A}^{(1B)} + \dot{I}_{1A}^{(1C)} + \dot{I}_{1A}^{(2A)} + \dot{I}_{1A}^{(2B)} + \dot{I}_{1A}^{(2C)} + \dot{I}_{1A}^{(3A)} + \dot{I}_{1A}^{(3B)} + \dot{I}_{1A}^{(3C)} \right). \tag{11}$$

Из схемы распределения амплитудных значений волн электромагнитного поля по линейному проводу однородного участка ЛЭП трехпроводного исполнения (см. рис. 1) следует:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{1A}^{(1A)} &= \frac{A_{A2}}{Z_{cA1}} - \frac{A_{A1}}{Z_{cA1}}; & \dot{I}_{1A}^{(1B)} &= \frac{A_{B2}}{Z_{cAB1}} - \frac{A_{B1}}{Z_{cAB1}}; & \dot{I}_{1A}^{(1C)} &= \frac{A_{C2}}{Z_{cCA1}} - \frac{A_{C1}}{Z_{cCA1}}; \\ \dot{I}_{1A}^{(2A)} &= \frac{A_{A4}}{Z_{cA2}} - \frac{A_{A3}}{Z_{cA2}}; & \dot{I}_{1A}^{(2B)} &= \frac{A_{B4}}{Z_{cAB2}} - \frac{A_{B3}}{Z_{cAB2}}; & \dot{I}_{1A}^{(2C)} &= \frac{A_{C4}}{Z_{cCA2}} - \frac{A_{C3}}{Z_{cCA2}}; \\ \dot{I}_{1A}^{(3A)} &= \frac{A_{A6}}{Z_{cA3}} - \frac{A_{A5}}{Z_{cA3}}; & \dot{I}_{1A}^{(3B)} &= \frac{A_{B6}}{Z_{cAB3}} - \frac{A_{B5}}{Z_{cAB3}}; & \dot{I}_{1A}^{(3C)} &= \frac{A_{C6}}{Z_{cCA3}} - \frac{A_{C5}}{Z_{cCA3}}. \end{aligned} \right\}$$

Иначе эти соотношения можно записать так:

$$\left. \begin{aligned} A_{A2} &= \dot{I}_{1A}^{(1A)} Z_{cA1} + A_{A1}; & A_{B2} &= \dot{I}_{1A}^{(1B)} Z_{cAB1} + A_{B1}; & A_{C2} &= \dot{I}_{1A}^{(1C)} Z_{cCA1} + A_{C1}; \\ A_{A4} &= \dot{I}_{1A}^{(2A)} Z_{cA2} + A_{A3}; & A_{B4} &= \dot{I}_{1A}^{(2B)} Z_{cAB2} + A_{B3}; & A_{C4} &= \dot{I}_{1A}^{(2C)} Z_{cCA2} + A_{C3}; \\ A_{A6} &= \dot{I}_{1A}^{(3A)} Z_{cA3} + A_{A5}; & A_{B6} &= \dot{I}_{1A}^{(3B)} Z_{cAB3} + A_{B5}; & A_{C6} &= \dot{I}_{1A}^{(3C)} Z_{cCA3} + A_{C5}. \end{aligned} \right\} \tag{12}$$

Чтобы реализовать эти соотношения, надо иметь сведения о численных значениях токов, входящих в их состав. В этой связи уместно вспомнить, что токи обратно пропорциональны соответствующим волновым сопротивлениям: ток $\dot{I}_{1A}^{(1A)}$ обратно пропорционален собственному волновому сопротивлению Z_{cA1} ; ток $\dot{I}_{1A}^{(1B)}$ обратно пропорционален взаимному волновому сопротивлению Z_{cAB1} ; ток $\dot{I}_{1A}^{(1C)}$ – взаимному волновому сопротивлению Z_{cCA1} ; ток $\dot{I}_{1A}^{(2A)}$ – собственному волновому сопротивлению Z_{cA2} ; ток $\dot{I}_{1A}^{(2B)}$ – взаимному волновому сопротивлению Z_{cAB2} ; ток $\dot{I}_{1A}^{(2C)}$ – взаимному волновому сопротивлению Z_{cCA2} ; ток $\dot{I}_{1A}^{(3A)}$ – собственному волновому сопротивлению Z_{cA3} ; ток $\dot{I}_{1A}^{(3B)}$ – взаимному волновому сопротивлению Z_{cAB3} , а ток $\dot{I}_{1A}^{(3C)}$ обратно пропорционален взаимному волновому сопротивлению Z_{cCA3} . Но тогда справедливо следующее:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\dot{I}_{1A}^{(1A)}}{\dot{I}_{1A}^{(2A)}} &= \frac{Z_{cA2}}{Z_{cA1}} = \gamma_1; & \frac{\dot{I}_{1A}^{(1A)}}{\dot{I}_{1A}^{(3A)}} &= \frac{Z_{cA3}}{Z_{cA1}} = \gamma_1; & \frac{\dot{I}_{1A}^{(1B)}}{\dot{I}_{1A}^{(2B)}} &= \frac{Z_{cAB2}}{Z_{cAB1}} = \gamma_1; \\ \frac{\dot{I}_{1A}^{(1B)}}{\dot{I}_{1A}^{(3B)}} &= \frac{Z_{cAB3}}{Z_{cAB1}} = \gamma_1; & \frac{\dot{I}_{1A}^{(1C)}}{\dot{I}_{1A}^{(2C)}} &= \frac{Z_{cCA2}}{Z_{cCA1}} = \gamma_1; & \frac{\dot{I}_{1A}^{(1C)}}{\dot{I}_{1A}^{(3C)}} &= \frac{Z_{cCA3}}{Z_{cCA1}} = \gamma_1; \end{aligned} \right\}$$

$$\frac{i_{1A}^{(1A)}}{i_{1A}^{(1B)}} = \frac{Z_{cAB1}}{Z_{cA1}} = \frac{Z_{0B}Z_{0C} - Z_{0BC}^2}{Z_{0CA}Z_{0BC} - Z_{0AB}Z_{0C}}; \quad \frac{i_{1A}^{(1A)}}{i_{1A}^{(1C)}} = \frac{Z_{cCA1}}{Z_{cA1}} = \frac{Z_{0B}Z_{0C} - Z_{0BC}^2}{Z_{0AB}Z_{0BC} - Z_{0CA}Z_{0B}},$$

где Z_{0B} , Z_{0C} , Z_{0AB} , Z_{0BC} и Z_{0CA} – первичные параметры однородного участка ЛЭП трехпроводного исполнения [20].

Эти равенства позволят выразить все токи через ток $i_{1A}^{(1A)}$:

$$\left. \begin{aligned} i_{1A}^{(2A)} &= \frac{\gamma_2}{\gamma_1} i_{1A}^{(1A)}; & i_{1A}^{(3A)} &= \frac{\gamma_3}{\gamma_1} i_{1A}^{(1A)}; \\ i_{1A}^{(1B)} &= \frac{Z_{0CA}Z_{0BC} - Z_{0AB}Z_{0C}}{Z_{0B}Z_{0C} - Z_{0BC}^2} i_{1A}^{(1A)}; & i_{1A}^{(2B)} &= \frac{\gamma_2 (Z_{0CA}Z_{0BC} - Z_{0AB}Z_{0C})}{\gamma_1 (Z_{0B}Z_{0C} - Z_{0BC}^2)} i_{1A}^{(1A)}; \\ i_{1A}^{(3B)} &= \frac{\gamma_3 (Z_{0CA}Z_{0BC} - Z_{0AB}Z_{0C})}{\gamma_1 (Z_{0B}Z_{0C} - Z_{0BC}^2)} i_{1A}^{(1A)}; & i_{1A}^{(1C)} &= \frac{Z_{0AB}Z_{0BC} - Z_{0CA}Z_{0B}}{Z_{0B}Z_{0C} - Z_{0BC}^2} i_{1A}^{(1A)}; \\ i_{1A}^{(2C)} &= \frac{\gamma_2 (Z_{0AB}Z_{0BC} - Z_{0CA}Z_{0B})}{\gamma_1 (Z_{0B}Z_{0C} - Z_{0BC}^2)} i_{1A}^{(1A)}; & i_{1A}^{(3C)} &= \frac{\gamma_3 (Z_{0AB}Z_{0BC} - Z_{0CA}Z_{0B})}{\gamma_1 (Z_{0B}Z_{0C} - Z_{0BC}^2)} i_{1A}^{(1A)}. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Если эти формулы подставить в уравнения (11), то получится уравнение с одним неизвестным, каковым в данном случае является ток $i_{1A}^{(1A)}$. Его решение позволит определить формулу для вычисления этого тока:

$$i_{1A}^{(1A)} = \frac{3i_{1A}\gamma_1 (Z_{0B}Z_{0C} - Z_{0BC}^2)}{(\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3)(Z_{0B}Z_{0C} - Z_{0BC}^2 + Z_{0CA}Z_{0BC} - Z_{0AB}Z_{0C} + Z_{0AB}Z_{0BC} - Z_{0CA}Z_{0B})}. \quad (14)$$

При подстановке в это уравнение равенств (12) в первое уравнение системы (5) с учетом формул (14) и (13) получается следующее:

$$\begin{aligned} 3\dot{U}_{1A} &= 2A_{A1} + 2A_{A3} + 2A_{A5} + \\ &+ \frac{3\Delta i_{1A} + 0}{(\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3)(Z_{0B}Z_{0C} - Z_{0BC}^2 + Z_{0CA}Z_{0BC} - Z_{0AB}Z_{0C} + Z_{0AB}Z_{0BC} - Z_{0CA}Z_{0B})} = \\ &= 2A_{A1} + 2A_{A3} + 2A_{A5} + a, \end{aligned} \quad (15)$$

где

$$\Delta = (Z_{0B}Z_{0C} - Z_{0BC}^2)(\gamma_1 Z_{cA1} + \gamma_2 Z_{cA2} + \gamma_3 Z_{cA3}).$$

Подобное рассуждение применительно и к линейным проводам B и C . В результате таких действий получаются уравнения:

$$\begin{aligned} 3\dot{U}_{1B} &= 2A_{B1} + 2A_{B3} + 2A_{B5} + \\ &+ \frac{3\Delta i_{1B} + 0}{(\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3)(Z_{0A}Z_{0C} - Z_{0CA}^2 + Z_{0CA}Z_{0BC} - Z_{0AB}Z_{0C} + Z_{0AB}Z_{0CA} - Z_{0A}Z_{0BC})} = \\ &= 2A_{B1} + 2A_{B3} + 2A_{B5} + b; \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} 3\dot{U}_{1C} &= 2A_{C1} + 2A_{C3} + 2A_{C5} + \\ &+ \frac{3\Delta i_{1C} + 0}{(\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3)(Z_{0A}Z_{0B} - Z_{0AB}^2 + Z_{0AB}Z_{0BC} - Z_{0CA}Z_{0B} + Z_{0AB}Z_{0CA} - Z_{0A}Z_{0BC})} = \\ &= 2A_{C1} + 2A_{C3} + 2A_{C5} + c. \end{aligned} \quad (17)$$

Уравнения (15)–(17) образуют систему уравнений с девятью неизвестными. Для их совместного решения необходимо еще 6 уравнений. Их можно получить искусственно, используя производные уравнений (1) по переменной l . Вторую и четвертые производные.

Вторая производная первого уравнения системы (1) по переменной l имеет вид:

$$\frac{d^2 \dot{U}_A}{dl^2} = \frac{1}{3} \left[\gamma_1^2 (A_{A1} e^{\gamma_1 l} + A_{A2} e^{-\gamma_1 l}) + \gamma_2^2 (A_{A3} e^{\gamma_2 l} + A_{A4} e^{-\gamma_2 l}) + \gamma_3^2 (A_{A5} e^{\gamma_3 l} + A_{A6} e^{-\gamma_3 l}) \right].$$

При условии $l = 0$ это уравнение примет вид:

$$\frac{d^2 \dot{U}_{1A}}{dl^2} = \frac{1}{3} \left[\gamma_1^2 (A_{A1} + A_{A2}) + \gamma_2^2 (A_{A3} + A_{A4}) + \gamma_3^2 (A_{A5} + A_{A6}) \right].$$

С учетом формул (12), (13) и (14) это уравнение переписывается следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \dot{U}_{1A}}{dl^2} &= \frac{1}{3} \left[2\gamma_1^2 A_{A1} + 2\gamma_2^2 A_{A3} + 2\gamma_3^2 A_{A5} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{3\Delta \dot{I}_{1A} (\gamma_1^2 + \gamma_2^2 + \gamma_3^2)}{(\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3) (\underline{Z}_{0B} \underline{Z}_{0C} - \underline{Z}_{0BC}^2 + \underline{Z}_{0CA} \underline{Z}_{0BC} - \underline{Z}_{0AB} \underline{Z}_{0C} + \underline{Z}_{0AB} \underline{Z}_{0BC} - \underline{Z}_{0CA} \underline{Z}_{0B})} \right] = \\ &= \frac{1}{3} (2\gamma_1^2 A_{A1} + 2\gamma_2^2 A_{A3} + 2\gamma_3^2 A_{A5} + d). \end{aligned} \tag{18}$$

Аналогично определяются вторые производные напряжений в начале линейных проводов B и C по переменной l :

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \dot{U}_{1B}}{dl^2} &= \frac{1}{3} \left[2\gamma_1^2 A_{B1} + 2\gamma_2^2 A_{B3} + 2\gamma_3^2 A_{B5} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{3\Delta \dot{I}_{1B} (\gamma_1^2 + \gamma_2^2 + \gamma_3^2)}{(\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3) (\underline{Z}_{0A} \underline{Z}_{0C} - \underline{Z}_{0CA}^2 + \underline{Z}_{0CA} \underline{Z}_{0BC} - \underline{Z}_{0AB} \underline{Z}_{0C} + \underline{Z}_{0AB} \underline{Z}_{0CA} - \underline{Z}_{0A} \underline{Z}_{0BC})} \right] = \\ &= \frac{1}{3} (2\gamma_1^2 A_{B1} + 2\gamma_2^2 A_{B3} + 2\gamma_3^2 A_{B5} + f); \end{aligned} \tag{19}$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \dot{U}_{1C}}{dl^2} &= \frac{1}{3} \left[2\gamma_1^2 A_{C1} + 2\gamma_2^2 A_{C3} + 2\gamma_3^2 A_{C5} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{3\Delta \dot{I}_{1C} (\gamma_1^2 + \gamma_2^2 + \gamma_3^2)}{(\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3) (\underline{Z}_{0A} \underline{Z}_{0B} - \underline{Z}_{0AB}^2 + \underline{Z}_{0AB} \underline{Z}_{0BC} - \underline{Z}_{0CA} \underline{Z}_{0B} + \underline{Z}_{0AB} \underline{Z}_{0CA} - \underline{Z}_{0A} \underline{Z}_{0BC})} \right] = \\ &= \frac{1}{3} (2\gamma_1^2 A_{C1} + 2\gamma_2^2 A_{C3} + 2\gamma_3^2 A_{C5} + g). \end{aligned} \tag{20}$$

Иначе вторые производные напряжений в начале линейных проводов однородного участка ЛЭП трехпроводного исполнения можно выразить через первичные параметры анализируемого участка ЛЭП следующим образом [20]:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \dot{U}_{1A}}{dl^2} &= (\underline{Z}_{0A} \underline{Y}_{0A0} + \underline{Z}_{0A} \underline{Y}_{0AB} + \underline{Z}_{0A} \underline{Y}_{0CA} - \underline{Z}_{0AB} \underline{Y}_{0AB} - \underline{Z}_{0CA} \underline{Y}_{0CA}) \dot{U}_{1A} - \\ &\quad - (\underline{Z}_{0A} \underline{Y}_{0AB} - \underline{Z}_{0AB} \underline{Y}_{0B0} - \underline{Z}_{0AB} \underline{Y}_{0BC} - \underline{Z}_{0AB} \underline{Y}_{0AB} + \underline{Z}_{0CA} \underline{Y}_{0BC}) \dot{U}_{1B} - \\ &\quad - (\underline{Z}_{0A} \underline{Y}_{0CA} + \underline{Z}_{0AB} \underline{Y}_{0BC} - \underline{Z}_{0CA} \underline{Y}_{0C0} - \underline{Z}_{0CA} \underline{Y}_{0CA} - \underline{Z}_{0CA} \underline{Y}_{0BC}) \dot{U}_{1C} = D; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \dot{U}_{1B}}{dl^2} &= (\underline{Z}_{0B} \underline{Y}_{0B0} + \underline{Z}_{0B} \underline{Y}_{0BC} + \underline{Z}_{0B} \underline{Y}_{0AB} - \underline{Z}_{0AB} \underline{Y}_{0AB} - \underline{Z}_{0BC} \underline{Y}_{0BC}) \dot{U}_{1B} - \\ &\quad - (\underline{Z}_{0B} \underline{Y}_{0AB} - \underline{Z}_{0AB} \underline{Y}_{0A0} - \underline{Z}_{0AB} \underline{Y}_{0AB} - \underline{Z}_{0AB} \underline{Y}_{0CA} + \underline{Z}_{0BC} \underline{Y}_{0CA}) \dot{U}_{1A} - \\ &\quad - (\underline{Z}_{0B} \underline{Y}_{0BC} + \underline{Z}_{0AB} \underline{Y}_{0CA} - \underline{Z}_{0BC} \underline{Y}_{0C0} - \underline{Z}_{0BC} \underline{Y}_{0CA} - \underline{Z}_{0BC} \underline{Y}_{0BC}) \dot{U}_{1C} = E; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \dot{U}_{1C}}{dl^2} &= (\underline{Z}_{0C} \underline{Y}_{0C0} + \underline{Z}_{0C} \underline{Y}_{0CA} + \underline{Z}_{0C} \underline{Y}_{0BC} - \underline{Z}_{0CA} \underline{Y}_{0CA} - \underline{Z}_{0BC} \underline{Y}_{0BC}) \dot{U}_{1C} - \\ &\quad - (\underline{Z}_{0C} \underline{Y}_{0CA} - \underline{Z}_{0AB} \underline{Y}_{0A0} - \underline{Z}_{0AB} \underline{Y}_{0AB} - \underline{Z}_{0AB} \underline{Y}_{0CA} + \underline{Z}_{0BC} \underline{Y}_{0AB}) \dot{U}_{1A} - \\ &\quad - (\underline{Z}_{0C} \underline{Y}_{0BC} + \underline{Z}_{0AB} \underline{Y}_{0AB} - \underline{Z}_{0BC} \underline{Y}_{0B0} - \underline{Z}_{0BC} \underline{Y}_{0BC} - \underline{Z}_{0BC} \underline{Y}_{0AB}) \dot{U}_{1B} = F. \end{aligned}$$

Если совместить эти уравнения с уравнениями (18)–(20), то получится следующее:

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{3}(2\gamma_1^2 A_{A1} + 2\gamma_2^2 A_{A3} + 2\gamma_3^2 A_{A5} + d) &= D; \\ \frac{1}{3}(2\gamma_1^2 A_{B1} + 2\gamma_2^2 A_{B3} + 2\gamma_3^2 A_{B5} + f) &= E; \\ \frac{1}{3}(2\gamma_1^2 A_{C1} + 2\gamma_2^2 A_{C3} + 2\gamma_3^2 A_{C5} + g) &= F. \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

Четвертая производная напряжения в линии A по переменной l может быть представлена в следующем виде:

$$\frac{d^4 \dot{U}_A}{dl^4} = \frac{1}{3} \left[\gamma_1^4 (A_{A1} e^{\gamma_1 l} + A_{A2} e^{-\gamma_1 l}) + \gamma_2^4 (A_{A3} e^{\gamma_2 l} + A_{A4} e^{-\gamma_2 l}) + \gamma_3^4 (A_{A5} e^{\gamma_3 l} + A_{A6} e^{-\gamma_3 l}) \right].$$

Для начала линейного провода A при условии $l = 0$ это уравнение с учетом равенств (12) и (13) после ряда преобразований получается переписывается так:

$$\begin{aligned} \frac{d^4 \dot{U}_{1A}}{dl^4} &= \frac{1}{3} \left[2\gamma_1^4 A_{A1} + 2\gamma_2^4 A_{A3} + 2\gamma_3^4 A_{A5} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{3\Delta i_{1A} (\gamma_1^4 + \gamma_2^4 + \gamma_3^4)}{(\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3) (Z_{0B} Z_{0C} - Z_{0BC}^2 + Z_{0CA} Z_{0BC} - Z_{0AB} Z_{0C} + Z_{0AB} Z_{0BC} - Z_{0CA} Z_{0B})} \right] = \\ &= \frac{1}{3} (2\gamma_1^4 A_{A1} + 2\gamma_2^4 A_{A3} + 2\gamma_3^4 A_{A5} + h). \end{aligned} \quad (22)$$

Аналогично определяются четвертые производные напряжений в начале других линейных проводов:

$$\begin{aligned} \frac{d^4 \dot{U}_{1B}}{dl^4} &= \frac{1}{3} \left[2\gamma_1^4 A_{B1} + 2\gamma_2^4 A_{B3} + 2\gamma_3^4 A_{B5} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{3\Delta i_{1B} (\gamma_1^4 + \gamma_2^4 + \gamma_3^4)}{(\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3) (Z_{0A} Z_{0C} - Z_{0CA}^2 + Z_{0CA} Z_{0BC} - Z_{0AB} Z_{0C} + Z_{0AB} Z_{0CA} - Z_{0A} Z_{0BC})} \right] = \\ &= \frac{1}{3} (2\gamma_1^4 A_{B1} + 2\gamma_2^4 A_{B3} + 2\gamma_3^4 A_{B5} + k); \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^4 \dot{U}_{1C}}{dl^4} &= \frac{1}{3} \left[2\gamma_1^4 A_{C1} + 2\gamma_2^4 A_{C3} + 2\gamma_3^4 A_{C5} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{3\Delta i_{1C} (\gamma_1^4 + \gamma_2^4 + \gamma_3^4)}{(\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3) (Z_{0A} Z_{0B} - Z_{0AB}^2 + Z_{0AB} Z_{0BC} - Z_{0CA} Z_{0B} + Z_{0AB} Z_{0CA} - Z_{0A} Z_{0BC})} \right] = \\ &= \frac{1}{3} (2\gamma_1^4 A_{C1} + 2\gamma_2^4 A_{C3} + 2\gamma_3^4 A_{C5} + m). \end{aligned} \quad (24)$$

Иначе эти производные можно представить так:

$$\begin{aligned} \frac{d^4 U_{1A}}{dl^4} &= (Z_{0A} Y_{0A0} + Z_{0A} Y_{0AB} + Z_{0A} Y_{0CA} - Z_{0AB} Y_{0AB} - Z_{0CA} Y_{0CA}) D - \\ &\quad - (Z_{0A} Y_{0AB} - Z_{0AB} Y_{0B0} - Z_{0AB} Y_{0BC} - Z_{0AB} Y_{0AB} + Z_{0CA} Y_{0BC}) E - \\ &\quad - (Z_{0A} Y_{0CA} + Z_{0AB} Y_{0BC} - Z_{0CA} Y_{0C0} - Z_{0CA} Y_{0CA} - Z_{0CA} Y_{0BC}) F = G; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d^4 U_{1B}}{dl^4} &= (Z_{0B} Y_{0B0} + Z_{0B} Y_{0BC} + Z_{0B} Y_{0AB} - Z_{0AB} Y_{0AB} - Z_{0BC} Y_{0BC}) E - \\ &\quad - (Z_{0B} Y_{0AB} - Z_{0AB} Y_{0A0} - Z_{0AB} Y_{0AB} - Z_{0AB} Y_{0CA} + Z_{0BC} Y_{0CA}) D - \\ &\quad - (Z_{0B} Y_{0BC} + Z_{0AB} Y_{0CA} - Z_{0BC} Y_{0C0} - Z_{0BC} Y_{0CA} - Z_{0BC} Y_{0BC}) F = H; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d^4 U_{1C}}{dl^4} &= (Z_{0C} Y_{0C0} + Z_{0C} Y_{0CA} + Z_{0C} Y_{0BC} - Z_{0CA} Y_{0CA} - Z_{0BC} Y_{0BC}) F - \\ &\quad - (Z_{0C} Y_{0CA} - Z_{0AB} Y_{0A0} - Z_{0AB} Y_{0AB} - Z_{0AB} Y_{0CA} + Z_{0BC} Y_{0AB}) D - \\ &\quad - (Z_{0C} Y_{0BC} + Z_{0AB} Y_{0AB} - Z_{0BC} Y_{0B0} - Z_{0BC} Y_{0BC} - Z_{0BC} Y_{0AB}) E = J. \end{aligned}$$

Объединение этих уравнений с уравнениями (22)–(24) позволит получить следующее:

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{3}(2\gamma_1^4 A_{A1} + 2\gamma_2^4 A_{A3} + 2\gamma_3^4 A_{A5} + h) &= G; \\ \frac{1}{3}(2\gamma_1^4 A_{B1} + 2\gamma_2^4 A_{B3} + 2\gamma_3^4 A_{B5} + k) &= H; \\ \frac{1}{3}(2\gamma_1^4 A_{C1} + 2\gamma_2^4 A_{C3} + 2\gamma_3^4 A_{C5} + m) &= J. \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

Совместное решение уравнений (15)–(17), (21) и (25) позволит сформировать формулы для вычисления постоянных интегрирования A_{A1} , A_{A3} , A_{A5} , A_{B1} , A_{B3} , A_{B5} , A_{C1} , A_{C3} и A_{C5} :

$$A_{A1} = \frac{3G - 3D(\gamma_2^2 + \gamma_3^2) + 3\gamma_2^2\gamma_3^2\dot{U}_{1A} - a\gamma_2^2\gamma_3^2 + d(\gamma_2^2 + \gamma_3^2) - h}{2\gamma_1^4 - 2\gamma_1(\gamma_2^2 + \gamma_3^2) + 2\gamma_2^2\gamma_3^2};$$

$$A_{A3} = \frac{3D - 2A_{A1}(\gamma_1 - \gamma_3) - 3\gamma_3^2\dot{U}_{1A} + a\gamma_3^2 - d}{2(\gamma_2^2 - \gamma_3^2)};$$

$$A_{A5} = \frac{3\dot{U}_{1A} - a}{2} - A_{A1} - A_{A3};$$

$$A_{B1} = \frac{3H - 3E(\gamma_2^2 + \gamma_3^2) + 3\gamma_2^2\gamma_3^2\dot{U}_{1B} - b\gamma_2^2\gamma_3^2 + f(\gamma_2^2 + \gamma_3^2) - k}{2\gamma_1^4 - 2\gamma_1(\gamma_2^2 + \gamma_3^2) + 2\gamma_2^2\gamma_3^2};$$

$$A_{B3} = \frac{3E - 2A_{B1}(\gamma_1 - \gamma_3) - 3\gamma_3^2\dot{U}_{1B} + b\gamma_3^2 - f}{2(\gamma_2^2 - \gamma_3^2)};$$

$$A_{B5} = \frac{3\dot{U}_{1B} - b}{2} - A_{B1} - A_{B3};$$

$$A_{C1} = \frac{3J - 3F(\gamma_2^2 + \gamma_3^2) + 3\gamma_2^2\gamma_3^2\dot{U}_{1C} - c\gamma_2^2\gamma_3^2 + g(\gamma_2^2 + \gamma_3^2) - m}{2\gamma_1^4 - 2\gamma_1(\gamma_2^2 + \gamma_3^2) + 2\gamma_2^2\gamma_3^2};$$

$$A_{C3} = \frac{3F - 2A_{C1}(\gamma_1 - \gamma_3) - 3\gamma_3^2\dot{U}_{1C} + c\gamma_3^2 - g}{2(\gamma_2^2 - \gamma_3^2)};$$

$$A_{C5} = \frac{3\dot{U}_{1C} - c}{2} - A_{C1} - A_{C3}.$$

Постоянные интегрирования A_{A2} , A_{A4} , A_{A6} , A_{B2} , A_{B4} , A_{B6} , A_{C2} , A_{C4} и A_{C6} вычисляются по формулам (12).

Постоянные интегрирования совместно с постоянными распространения волн электромагнитного поля по линейным проводам ЛЭП и соответствующими волновыми сопротивлениями, судя по рис. 1, определяют амплитуды падающих и отраженных волн на всей протяженности однородного участка линии электропередачи трехпроводного исполнения. Кроме того, численные значения этих величин дают реальную возможность прогнозирования напряжений и токов на однородном участке трехпроводной ЛЭП по формулам (1)–(4). Но для этого необходимо иметь достоверные сведения не только о численных значениях первичных параметров анализируемого участка трехфазной ЛЭП, но и о численных значениях входных напряжений и токов. Графическая интерпретация результатов такого прогнозирования приведена на рис. 2 и 3. Здесь показана графическая интерпретация распределения фазного напряжения и линейного тока по однородному участку ЛЭП-220 кВ трехпроводного исполнения на частоте 13-й гармонической составляющей. Этими интерпретациями подтверждается волновой характер распределения напряжений и токов по проводам ЛЭП трехпроводного исполнения со сравнительно небольшой длиной волны [20].

Прогнозирование напряжений и токов при пониженном качестве электрической энергии следует выполнять для каждой гармонической составляющей. А чтобы иметь представление обо всем напряжении и обо всем токе, полученные таким образом данные следует обобщить на весь спектр основных характеристик электрической энергии.

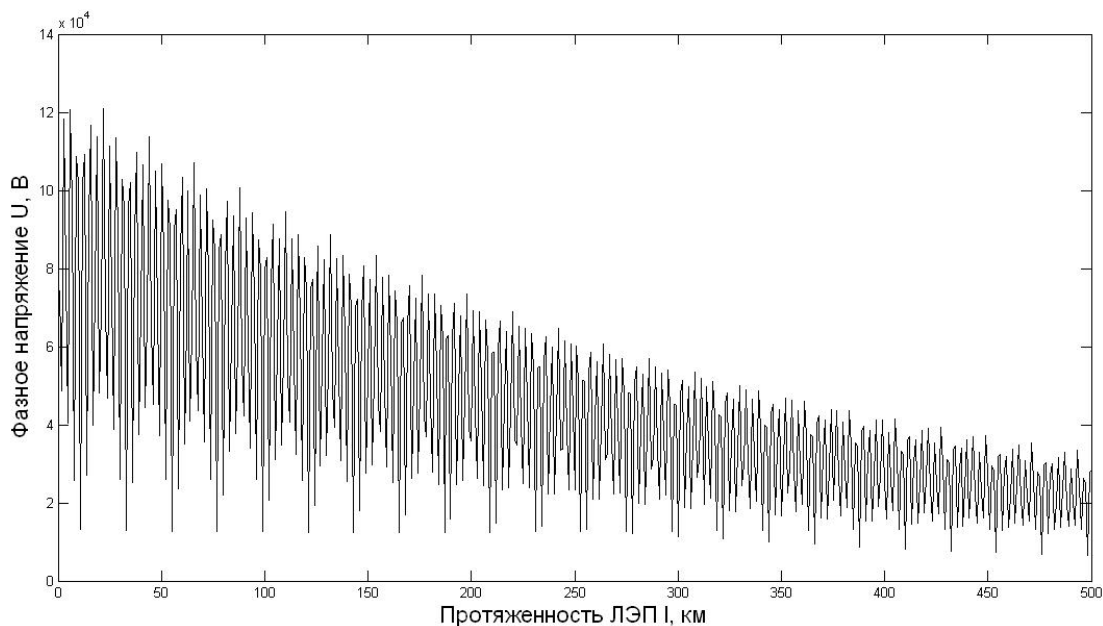


Рис. 2. Графическая интерпретация распределения фазного напряжения на частоте 13-й гармонической составляющей по однородному участку ЛЭП трехпроводного исполнения

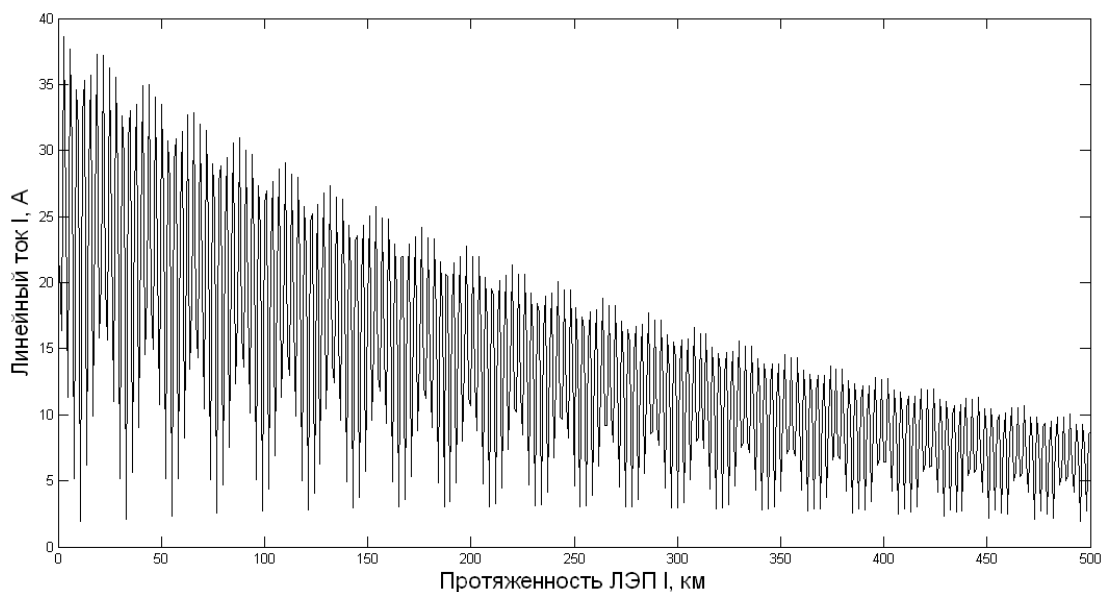


Рис. 3. Графическая интерпретация распределения линейного тока на частоте 13-й гармонической составляющей по однородному участку ЛЭП трехпроводного исполнения

Результаты

Разработана методика определения численных значений постоянных интегрирования, необходимых для прогнозирования напряжений и токов на однородном участке ЛЭП трехпроводного исполнения. Постоянные интегрирования вместе с постоянными распространения волн электромагнитного поля и волновыми сопротивлениями позволят получить сведения об амплитудных значениях падающих и отраженных волн, обеспечивающих передачу электрической энергии по однородному участку трехпроводной линии электропередачи. Общее представление об амплитудах этих

волн позволит получить схема их распределения по линейному проводу исследуемой ЛЭП, изображенная на рис. 1, или графические интерпретации распределения фазного напряжения.

Заключение

Результаты описываемого здесь исследования могут быть использованы на стадии проектирования, реконструкции и эксплуатации ЛЭП трехпроводного исполнения напряжением 220 кВ и выше протяженностью более 200 км для прогнозирования напряжений и токов на различных участках линии электропередачи. А при пониженном каче-

стве электрической энергии предлагаемая методика может быть использована и при анализе функционирования ЛЭП напряжением 35 кВ и выше протяженностью несколько десятков километров и более.

Прогнозирование амплитудных значений падающих и отраженных волн электромагнитного поля в линейных проводах двухцепной ЛЭП позволит детально проанализировать напряжения и токи на однородном участке линии электропередачи. Этот факт позволит разработать наиболее приемлемые способы оптимизации передачи электрической энергии. Причем применение предлагаемой методики возможно и в условиях пониженного качества электрической энергии. В этом случае все расчеты выполняются для каждой гармонической составляющей напряжения и тока с последующим обобщением полученных результатов на весь спектр основных характеристик электрической энергии.

Литература

- Gouda, O.E. Effect of electromagnetic field of overhead transmission lines on metallic gas pipe-lines / O.E. Gouda, A.Z. El-Dein, M.A.H. El-Gabalawy // *Electric Power System Research*. – 2013. – No. 103. – P. 129–136. DOI: 10.1016/j.epsr.2013.05.002
- Арпилага, Дж. Гармоники в электрических системах: пер. с англ. / Дж. Арпилага, Д. Брэдли, П. Боджер. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
- Анализ электромагнитных процессов в однородной длинной линии / А.Я. Якушев, А.Г. Середа, М.Н. Василенко и др. // *Электротехника*. – 2017. – № 10. – С. 23–28.
- Большанин, Г.А. Особенности распространения электрической энергии по трехпроводной линии электропередачи / Г.А. Большанин, Л.Ю. Большанина, Е.Г. Марьясова // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. – 2010. – № 4 (28). – С. 197–204.
- Физический энциклопедический словарь / гл. ред. Б.А. Введенский, Б.М. Вул. – М.: Советская энциклопедия, 1966. – Т. 5. – 576 с.
- Взаимовлияние двухцепных воздушных линий и их воздействие на режимы электрических систем / М.Ш. Мисриханов, В.Д. Попов, Н.Н. Якимчук, Р.В. Медов // *Электрические станции*. – 2001. – № 2. – С. 52–58.
- Рыжов, Ю.П. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения / Ю.П. Рыжов. – М.: Издат. дом МЭИ, 2007. – 488 с.
- Костенко, М.В. Волновые процессы и электрические поехи в многопроводных линиях высокого напряжения / М.В. Костенко, А.С. Перельман, Ю.П. Шкарин. – М.: Энергия, 1973. – 272 с.
- Электротехнический справочник. В 4 т. Т. 3: Производство, передача и распределение электрической энергии / под общ. ред. проф. МЭИ В.Г. Герасимова и др.; гл. ред. А.И. Попов. – 9-е изд., стер. – М.: Изд-во МЭИ, 2004. – 964 с.
- Справочник по электроснабжению и электрооборудованию промышленных предприятий и общественных зданий / под общ. ред. проф. МЭИ (ТУ) С.И. Гамазина, Б.И. Кудрина, С.А. Цырука. – М.: Издат. дом МЭИ, 2010. – 745 с.
- Мюльбаер, А.А. Особенности расчета наведенного напряжения на отключенной цепи двухцепной воздушной линии электропередачи / А.А. Мюльбаер // *Научный вестник НГТУ*. – 2016. – Т. 64, № 3. – С. 146–160. DOI: 10.17212/1814-1196-2016-3-146-160
- A survey on intelligent system transmission lines / V.H. Ferreira, R. Zanghi, R.B.M. Silva et al. // *Electric Power System Research*. – 2016. – No. 136. – P. 135–153. DOI: 10.1016/j.epsr.2016.02.002
- Sana, S. Fault detection in transmission networks of power systems / S. Sana, M. Aldeen, C. Fan. // *Electr. Power Energy Syst.* – 2011. – No. 33 (4). – P. 887–900. DOI: 10.1016/j.ijepes.2010.12.026
- Панова, Е.А. Уточненные удельные электрические параметры двухцепных ЛЭП 110 кВ для дистанционного определения места повреждения / Е.А. Панова, А.Я. Альбрехт // *Электротехнические системы и комплексы*. – 2016. – № 4 (33). – С. 35–40. DOI: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-35-40
- Mazon, A. Fault location system on double circuit twoterminal transmission lines based on ANNs / A. Mason, I. Zamera, J. Gracia et al. // *Proceeding of 2001 IEEE Porto Power Tech Porto*. – 2001. – Vol. 3. – P. 5. DOI: 10.1109/PTC.2001.964944
- Определение первичных продольных параметров воздушных и подземных линий электропередачи на основе расчета электромагнитного поля / М.В. Булатников, К.П. Кадомская, С.А. Кандаков, Ю.А. Лавров // *Электричество*. – 2016. – № 5. – С. 17–24.
- Bolatka, Josef. Pridavne ztrati v elektrizačni soustavě vlivem frekvenční závislosti pasivních odporu / Josef Bolatka // *Bull. EGU*. – 1986. – 97. – P. 48–56.
- A simulator for calculating normal induced voltage on communication line / J.-Y. Neo, H.-C. Seo, S.-J. Lee et al. // *Journal of Electrical Engineering and Technology*. – 2014. – Vol. 9, iss. 4. – P. 1394–1400. DOI: 10.5370/JEET.2014.9.4.1394
- Influence of neighboring transmission lines on the measurement transmission line UVN options at the operating frequency / S. Wang, W. Hu, G. Zou et al. // *Dianwang Jishu*. – 2014. – Vol. 38, no. 5. – P. 1162–1168.
- Большанин, Г.А. Передача электрической энергии по ЛЭП одно-, двух- и трехпроводного исполнений / Г.А. Большанин. – Братск: Изд-во БрГУ, 2016. – 313 с.
- Bol'shanin, G.A. Indirect Measurement of Aggregate Primary Parameters of a Two-Wire Transmission Line / G.A. Bol'shanin, L.Yu. Bol'shanina, E.G. Mar'yasova // *Measurement Techniques*. – 2016. – Vol. 59, iss. 5. – P. 521–525. DOI: 10.1007/s11018-016-1001-6

Большанин Георгий Анатольевич, канд. техн. наук, доцент, профессор, кафедра «Электроэнергетика и электротехника», Братский государственный университет, г. Братск; bolshaning@mail.ru.

Поступила в редакцию 8 мая 2018 г.

DOI: 10.14529/power180205

AMPLITUDE VALUES OF THE INCIDENT AND REFLECTED WAVES IN THE THREE-WIRE ELECTRICAL TRANSMISSION LINE

G.A. Bolshanin, bolshaning@mail.ru

Bratsk State University, Bratsk, Russian Federation

The transmission of electrical energy along the power lines is effected due to the electromagnetic field waves. In the three-wire power lines the transmission of electrical energy is provided for with three pairs of waves, each containing a falling and a reflected one. The amplitudes of these waves define the voltage and current values in the power lines. The article presents a diagram of the falling and reflected waves amplitude values distribution along a uniform section of a three-wire power line. It shows that electromagnetic waves amplitude values define integration constants. The diagram of the electromagnetic waves amplitude values distribution along the line wire of a three-wire power line shows that that the adjacent current carrying parts significantly impact the voltage and current values of the wire. This diagram is an functional means allowing determining the integration constants values. When the propagation constants of electromagnetic waves on the line conductors of the power line and the appropriate wave resistances are known, these values can be used to define the amplitude values of the falling and reflected modes along all power line. The outcomes of the research can be used in design, reconstruction, and maintenance of three-wire power lines to forecast the voltage and current values in different sections of a power line. Forecasting the amplitude values of the falling and reflected electromagnetic waves in the line wires of double-circuit transmission lines shall allow for the detailed analysis of voltages and currents in a uniform section of a power line. The suggested technique may also be applied for low-quality electric energy.

Keywords: a power line, the falling wave, the reflected wave, integration constants, quality of electric energy, tension, current.

References

1. Gouda O.E. El-Dein A.Z., El-Gabalawy M.A.H. [Effect of Electromagnetic Field of Overhead Transmission Lines on Metallic Gas Pipe-Lines]. *Electric Power System Research*, 2013, no. 103, pp. 129–136. DOI: 10.1016/j.epsr.2013.05.002
2. Arlilaga J., Bradley D., Bodger P. *Garmoniki v elektricheskikh sistemakh* [Harmonics in Electrical Systems: Trans. in English]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990. 320 p.
3. Yakushev A.Ya., Sereda A.G., Vasilenko V.N., Bulavsky P.E., Belosero V.L. [Analysis of Electromagnetic Processes in a Homogeneous Long Line]. *Electro Technical Equipment*, 2017, no. 10, pp. 23–28. (in Russ.)
4. Bolshanin G.A., Bolshanina L.Yu., Maryasova E.G. [Features of the Distribution of Electrical Energy through a Three-Wire Transmission Line]. *Modern Technologies. System Analysis. Modeling*, 2010, no. 4 (28), pp. 197–204. (in Russ.)
5. Vvedensky B.A., Vul B.M. (Ch. Eds.). *Fizicheskii entsiklopedicheskiy slovar'* [Encyclopedic Dictionary of Physics]. Vol. 5. Moscow, Soviet Encyclopedia, 1966. 576 p.
6. Misrikhanov M.Sh., Popov V.D., Yakimchuk N.N., Honey R.V. [Interaction of Double-Circuit Air Lines and Their Effect on the Modes of Electrical Systems]. *Electric Stations*, 2001, no. 2, pp. 52–58. (in Russ.)
7. Ryzhov Yu.P. *Dal'nie elektroperedachi sverkhvysokogo napryazheniya* [Long-Distance Ultrahigh Voltage Power Transmission]. Moscow, Publishing house MPEI, 2007. 488 p.
8. Kostenko M.V., Perelman A.S., Shkarin Yu.P. *Volnovye protsessy i elektricheskie pomekhi v mnogoprovodnykh liniyakh vysokogo napryazheniya* [Wave Processes and Electric Noise in Multi-Wire High-Voltage Lines]. Moscow, Energiya Publ., 1973. 272 p.
9. Gerasimov V.G. et al. (Eds.), A.I. Popov (Ch. Ed.). *Elektrotekhnicheskiy spravochnik. V 4-kh t. T.3: Proizvodstvo, peredacha i raspredelenie elektricheskoy energii* [Electrotechnical Handbook in 4 vol., vol. 3: Production, Transmission, and Distribution of Electric Energy]. 9 th ed. Moscow, Publishing house MPEI, 2004. 964 p.

10. Gamazin S.I., Kudrin B.I., Tsyruka S.A. (Eds.) *Spravochnik po elektrosnabzheniyu i elektrooborudovaniyu promyshlennykh predpriyatiy i obshchestvennykh zdaniy* [Handbook on Electricity and Electrical Equipment of Industrial Enterprises and Public Buildings]. Moscow, Publishing house MEI, 2010. 745 p.
11. Mulbaer A.A. [Features of the Calculation of the Induced Voltage on the Disconnected Circuit of a Dual-circuit Overhead Transmission Line]. *Scientific Bulletin of the NSTU*, 2016, vol. 64, no. 3, pp. 146–160. (in Russ.) DOI: 10.17212/1814-1196-2016-3-146-160
12. Ferreira V.H., Zanghi R., Silva R.B.M., Souza J.C.S., Guimarães C.H.C., Gomes S.Jr. [A Survey on Intelligent System Transmission Lines]. *Electric Power System Research*, 2016, no. 136, pp. 135–153. DOI: 10.1016/j.epsr.2016.02.002
13. Sana S., Aldeen M., Fan C. [Fault Detection in Transmission Networks of Power Systems]. *Electr. Power Energy Syst.*, 2011, no. 33 (4), pp. 887–900. DOI: 10.1016/j.ijepes.2010.12.026
14. Panova E.A., Albrecht A.Ya. [Specific Electrical Parameters of Dual-Circuit 110 kV Transmission Lines for Remote Fault Location Determination]. *Electrotechnical Systems and Complexes*, 2016, no. 4 (33), pp. 35–40. (in Russ.) DOI: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-35-40
15. Mazon A., Zamera I., Gracia J., Sagastabeitia K., Eguia P., Jurado F. et al. [Fault Location System on Double Circuit Twoterminal Transmission Lines Based on ANNs]. *Proceeding of 2001 IEEE Porto Power Tech Porto*, 2001, vol. 3, p. 5. DOI: 10.1109/PTC.2001.964944
16. Bulatnikov M.V., Kadomskaya K.P., Kandakov S.A., Lavrov Yu.A. [Determination of the Primary Longitudinal Parameters of Air and Ground Power Transmission Lines Based on the Calculation of the Electromagnetic Field]. *Electricity*, 2016, no. 5, pp. 17–24. (in Russ.)
17. Bolatka Josef. Pridavne ztrati v elektrizačni soustavě vlivem frekvenční závislosti pasivních odporu. *Bull. EGU*, 1986, 97, pp. 48–56.
18. Heo J.-Y., Seo H.-C., Lee Y.S. [A Simulator for Calculating Normal Induced Voltage on Communication Line]. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 2014, vol. 9, iss. 4, pp. 1394–1400. DOI: 10.5370/JEET.2014.9.4.1394
19. Wang S., Hu W., Zou Z., Wu Z., Li S., Sun Z. [Influence of Neighboring Transmission Lines on the Measurement Transmission Line UVN Options at the Operating Frequency]. *Dianwang Jishu*, 2014, vol. 38, no. 5, pp. 1162–1168.
20. Bolshanin G.A. *Peredacha elektricheskoy energii po LEP odno-, dvukh- i trekhprovodnogo ispolneniy* [Transmission of Electric Energy along Single, Twin and Three-wire Power Lines]. Bratsk, Publishing House of the BrSU, 2016. 313 p.
21. Bolshanin G.A., Bolshanina, Maryasova E.G. [Indirect Measurement of Aggregate Primary Parameters of a Two-Wire Transmission Line]. *Measurement Techniques*, August 2016, vol. 59, iss. 5, pp. 521–525. DOI: 10.1007/s11018-016-1001-6

Received 8 May 2018

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Большанин, Г.А. Амплитудные значения падающей и отраженной волн в линии электропередачи трехпроводного исполнения / Г.А. Большанин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2018. – Т. 18, № 2. – С. 36–47. DOI: 10.14529/power180205

FOR CITATION

Bolshanin G.A. Amplitude Values of the Incident and Reflected Waves in the Three-Wire Electrical Transmission Line. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2018, vol. 18, no. 2, pp. 36–47. (in Russ.) DOI: 10.14529/power180205