

Определение укрупненных первичных параметров двухпроводной линии электропередачи

Г.А. Большанин^{1 a}, Е.Г. Марьясова^{2 b}, Е.Г. Большанина^{1 c}

¹Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия

²Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса 20, Новосибирск, Россия

^abolshaning@mail.ru, ^bmarkageo@mail.ru, ^cdream.len@yandex.ru

Статья поступила 16.10.2016, принята 13.11.2016

Обычно сведения о первичных параметрах линии электропередачи (ЛЭП) берут из соответствующей справочной литературы. При этом не учитываются неизбежные эксплуатационные изменения численных значений этих параметров. В связи с этим предлагается способ определения укрупненных первичных параметров двухпроводной ЛЭП. Достоверность этого способа достигается в результате непосредственного измерения электрических величин, которые являются исходными данными для определения укрупненных первичных параметров двухпроводной ЛЭП. Предложено выполнить серию экспериментов из трех опытов с использованием одного источника синусоидального напряжения промышленной частоты ограниченной мощности: опыта холостого хода, опыта полного короткого замыкания и опыта неполного короткого замыкания, в результате которых определяются изображения на комплексной плоскости действующих значений входных и выходных напряжений и токов, которые являются исходными данными для определения укрупненных первичных параметров двухпроводной линии электропередачи. На основании полученных таким образом экспериментальных данных вычисляются укрупненные активные сопротивления и индуктивности линейных проводов, укрупненные активные проводимости и емкости между проводами, а также между проводами и «землей». Предлагаемый способ позволяет при необходимости определить укрупненные первичные параметры двухпроводной ЛЭП любой протяженности.

Ключевые слова: напряжение; ток; шестиполусник; укрупненные первичные и вторичные параметры; полные сопротивления; полные проводимости; режим передачи электрической энергии потребителю; опыт холостого хода.

Determination of the integrated primary parameters of two-wire power lines

G.A. Bolshinin^{1 a}, E.G. Mariyasova^{2 b}, E.G. Bolshanina^{1 c}

¹Bratsk State University; 40 Makarenko St., Bratsk, Russia

²Novosibirsk state technical university, Karl Marx Ave., 20, Novosibirsk, Russia

^abolshaning@mail.ru, ^bmarkageo@mail.ru, ^cdream.len@yandex.ru

Received 16.10.2016, accepted 13.11.2016

Usually data on primary parameters of a power line (high voltage line) take from the corresponding reference books. At the same time inevitable operational changes of numerical values of these parameters are not considered. The method of determination of the integrated primary parameters of the two-wire high voltage line is offered. Reliability of the offered method is reached as a result of direct measurement of electrical quantities which are basic data for determination of the integrated primary parameters of the two-wire high voltage line. It is offered to execute a series of experiments from three experiences with use of one source of sinusoidal tension of industrial frequency of limited capacity: experience of idling, experience of a dead short and experience of incomplete short circuit as a result of which images on the complex plane of the operating values of entrance and output tension and currents which are basic data for determination of the integrated primary parameters of the two-wire line of an electricity transmission are determined. Based on the experimental data obtained thus the integrated active resistance and inductance of linear wires integrated active conductivity and reservoir between wires, and also between wires and "earth" are calculated. The offered method allows to determine if necessary the integrated primary parameters of the two-wire high voltage line of any extent.

Key words: tension; current; six-pole network; integrated primary and secondary parameters; full resistance full of conductivity; the mode of transfer of electric energy to the consumer; experience of idling.

Введение

Сведения о первичных параметрах линии электропередачи (ЛЭП) необходимы для прогнозирования и анализа результатов передачи электрической энергии потребителю. Традиционно первичные параметры однородного участка ЛЭП определяются из специализированной справочной литературы [1; 2]. Это весьма

ориентировочные сведения. Более точно их можно определить из расчетов. Для этого достаточно воспользоваться рекомендациями, изложенными в [3–18], и учесть все возможные нюансы монтажа и эксплуатации ЛЭП. Это очень кропотливая, а часто и трудоемкая работа. Об оперативности учета всех возможных усло-

вий передачи электрической энергии говорить в этом случае не приходится.

Можно разделить исследуемую ЛЭП на несколько относительно однородных участков и определить по известным методикам первичные параметры каждого из них [19; 20], но это довольно громоздкая и кропотливая операция.

Полную информацию о передаче электрической энергии по ЛЭП можно получить со сравнительно меньшей трудоемкостью при использовании обобщенных, укрупненных параметров исследуемой линии электропередачи [21–26].

Укрупненные параметры ЛЭП следует делить на первичные и вторичные.

Укрупненными первичными параметрами следует считать параметры схемы замещения шестиполюсника, замещающего всю ЛЭП двухпроводного исполнения вместе с сопутствующей линейной арматурой.

Вся исследуемая линия электропередачи вместе с сопутствующей линейной арматурой воспринимается в этом случае как единое целое, как единый шестиполюсник [21; 27; 28]. Этот шестиполюсник включает в свой состав все однородные участки исследуемой ЛЭП, по каждому из которых передача электрической энергии обеспечивается двумя парами волн электромагнитного поля [3; 5; 21; 29–31], но при их объединении уместно вести речь о двух парах волн результирующего электромагнитного поля. Качественные характеристики этого поля оцениваются укрупненными вторичными параметрами, которые могут быть рассчитаны на основании сведений об укрупненных первичных параметрах исследуемой ЛЭП.

Методика исследования. Численные значения укрупненных первичных параметров целесообразно определять экспериментально.

На рис. 1 изображен шестиполюсник с П-образной схемой замещения, замещающий всю линию электропередачи двухпроводного исполнения вместе с сопутствующей линейной арматурой. Здесь символами R_1 , L_1 и R_2 , L_2 обозначены укрупненные активные сопротивления и индуктивности проводов. Символы G_{101} , G_{102} , C_{101} , C_{102} и G_{201} , G_{202} , C_{201} , C_{202} иллюстрируют укрупненные активные проводимости и емкости между проводами и заземленными конструктивными элементами ЛЭП. Активные проводимости G_{121} , G_{122} и емкость C_{121} , C_{122} иллюстрируют укрупненные электромагнитные связи между линейными проводами. Укрупненные первичные параметры исследуемой ЛЭП представлены здесь параметрами схемы замещения шестиполюсника в виде полных сопротивлений Z_1 , Z_2 и полных проводимостей Y_{101} , Y_{102} , Y_{201} , Y_{202} , Y_{121} , Y_{122} , которые могут быть определены так:

$$\begin{aligned} Z_1 &= R_1 + j\omega L_1; \\ Z_2 &= R_2 + j\omega L_2; \\ Y_{101} &= G_{101} + j\omega C_{101}; \\ Y_{102} &= G_{102} + j\omega C_{102}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Y_{201} &= G_{201} + j\omega C_{201}; \\ Y_{202} &= G_{202} + j\omega C_{202}; \\ Y_{121} &= G_{121} + j\omega C_{121}; \\ Y_{122} &= G_{122} + j\omega C_{122}. \end{aligned}$$

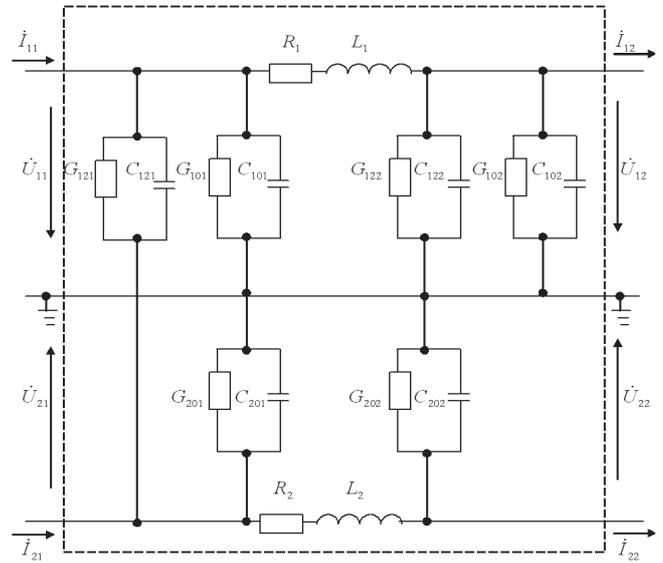


Рис. 1. П-образная схема замещения двухпроводной ЛЭП

На рис. 2 представлена схема экспериментальной установки для исследования режима передачи электрической энергии потребителю по ЛЭП двухпроводного исполнения — вариант исполнения экспериментальной установки с одним источником электрической энергии \dot{E} ограниченной мощности. В серии экспериментов, выполняемых по этой схеме, участвуют четыре вольтметра PV1–PV4, три амперметра PA1–PA3, шесть фазометров Pф1–Pф6 и четыре коммутационных устройства в виде ключей S1–S4. В качестве электрической нагрузки Н можно использовать набор резисторов или другой однофазный потребитель электрической энергии.

Назначение электроизмерительных приборов в этой схеме заключается в регистрации входных и выходных характеристик электрической энергии: вольтметры PV1–PV4 измеряют модули входных и выходных напряжений U_{11} , U_{12} , U_{21} и U_{22} ; амперметры PA1–PA3 — модули входных и выходных токов $I_{11} = I_{12}$, I_{21} и I_{22} . С помощью фазометров Pф1–Pф6 определяются их начальные фазы.

Вольтметры PV1 и PV2 регистрируют модули напряжений на входе шестиполюсника. Если известна величина \dot{E} источника электрической энергии, то можно ограничиться показаниями одного вольтметра, поскольку разница между напряжениями на входе первого и второго проводов анализируемой ЛЭП определяется величиной этой ЭДС: $\dot{U}_{11} - \dot{U}_{21} = \dot{E}$. По этому равенству определяется и начальная фаза одного из напряжений.

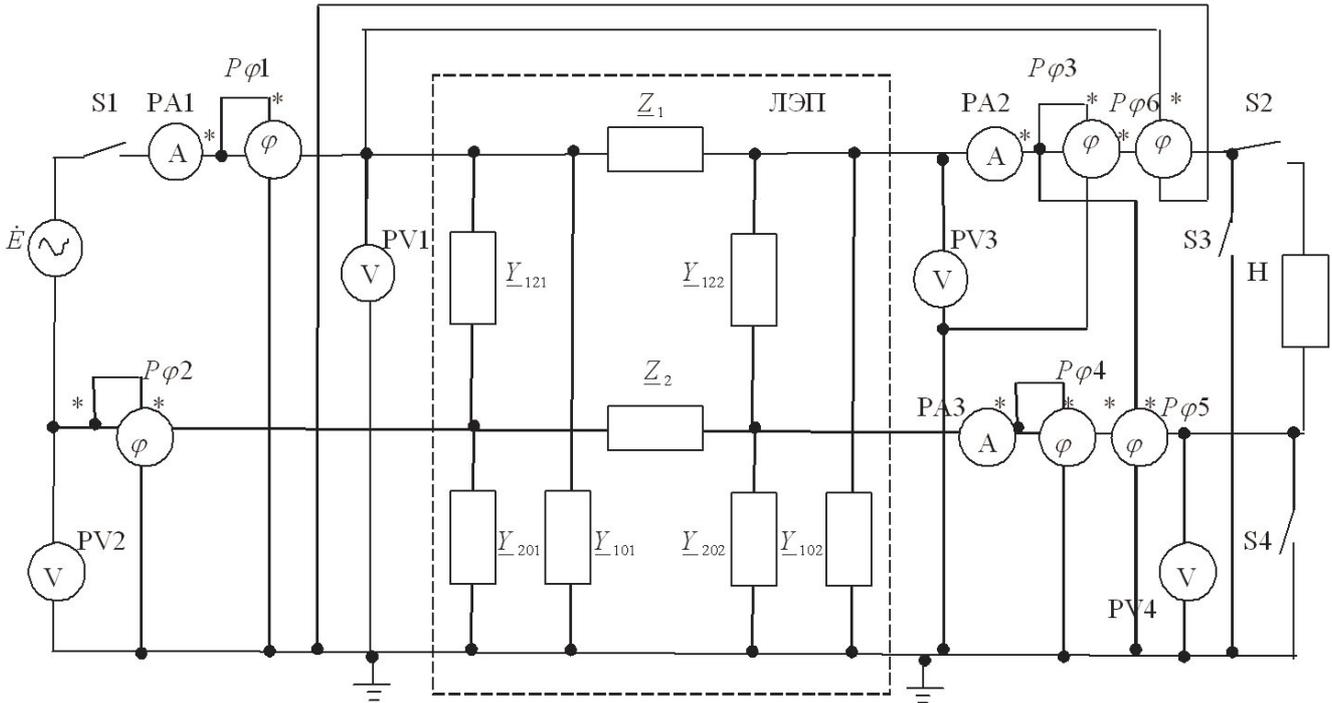


Рис. 2. Схема установки по определению укрупненных первичных параметров двухпроводной ЛЭП

По схеме (рис. 2) величины токов в начале первого и второго проводов одинаковы. Для регистрации модуля этих величин достаточен один амперметр PA1 ($I_{11} = I_{21}$).

Для регистрации начальных фаз входных напряжений и тока используются фазометры $P\phi 1$ и $P\phi 2$.

Пусть начальная фаза одного из входных напряжений, например на входе первого провода \dot{U}_{11} , будет известна. Пусть оно будет иметь нулевое значение $\phi_{1u1} = 0$. В принципе, оно может быть принято априорно любым.

Фазометр $P\phi 1$ фиксирует разность фаз между напряжением и током в начале первого провода: $\phi_1 = \phi_{1u1} - \phi_{1i1}$. Принимая во внимание, что начальная фаза напряжения в начале первого провода имеет нулевое значение, оказывается справедливым заключение о том, что фазометр $P\phi 1$ фиксирует отрицательную начальную фазу тока в начале первого провода: $\phi_1 = -\phi_{1i1}$.

Токи в начале обоих проводов, судя по схеме на рис. 2, абсолютно одинаковы. Одинаковы и их начальные фазы: $\phi_{1i1} = \phi_{2i1}$.

Фазометр $P\phi 2$ регистрирует разность фаз напряжения и тока в начале второго провода анализируемого участка ЛЭП: $\phi_2 = \phi_{2u1} - \phi_{2i1}$. Показания этого прибора позволяют найти начальную фазу напряжения в начале второго провода: $\phi_{2u1} = \phi_2 + \phi_{2i1}$.

В результате этих действий определяются комплексные значения входных напряжений и токов:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{11} &= U_{11} e^{j\phi_{1u1}}; \\ \dot{U}_{21} &= U_{21} e^{j\phi_{2u1}}; \\ \dot{I}_{11} &= I_{11} e^{j\phi_{1i1}}; \\ \dot{I}_{21} &= I_{21} e^{j\phi_{2i1}}. \end{aligned} \right\}$$

Токи в конце первого и второго провода одинаковы при замыкании ключа S2 и разомкнутых ключах S3 и S4. В иных условиях они разновелики. Поэтому для регистрации модулей этих токов используются два амперметра — PA2 и PA3.

Модули напряжений на конце первого и второго проводов регистрируют вольтметры PV3 и PV4.

Для определения начальных фаз напряжений и токов в конце первого и второго проводов следует воспользоваться показаниями фазометров $P\phi 3 - P\phi 6$.

Токовая обмотка фазометра $P\phi 6$ включена в конце первого провода, а его обмотка напряжения подключена через линии связи к началу этого же провода. В результате такого включения фазометр $P\phi 6$ фиксирует разность фаз напряжения в начале первого провода и тока — в конце этого же провода: $\phi_6 = \phi_{1u1} - \phi_{1i2}$. При известной начальной фазе в начале первого провода ($\phi_{1u1} = 0$) оказывается, что показание фазометра $P\phi 6$ определяет отрицательное значение начальной фазы тока в конце первого провода: $\phi_6 = -\phi_{1i2}$.

Показание фазометра $P\phi 3$ определяет разность фаз напряжения и тока в конце первого провода: $\phi_3 = \phi_{1u2} - \phi_{1i2}$. При известной начальной фазе тока в конце первого провода в таком случае можно определить начальную фазу напряжения в конце этого же провода: $\phi_{1u2} = \phi_3 + \phi_{1i2}$.

Токовая обмотка фазометра $P\phi 5$ включена в конце второго провода, а его обмотка напряжения подключена к концу первого провода, как показано на рис. 2. Такое включение фазометра дает возможность регистрации разности фаз напряжения в конце первого провода и тока — в конце второго провода: $\Phi_5 = \Phi_{1u2} - \Phi_{2i2}$. При известной начальной фазе напряжения в конце первого провода Φ_{1u2} по показанию фазометра $P\phi 5$ нетрудно определить начальную фазу тока в конце второго провода: $\Phi_{2i2} = \Phi_{1u2} - \Phi_5$.

Фазометр $P\phi 4$ регистрирует разность фаз между напряжением и током в конце второго провода: $\Phi_4 = \Phi_{2u2} - \Phi_{2i2}$. Выясненная ранее величина начальной фазы тока в конце второго провода Φ_{2i2} создает возможность определения начальной фазы напряжения в конце этого же провода: $\Phi_{2u2} = \Phi_4 + \Phi_{2i2}$.

Выполненные таким образом действия позволят определить комплексные величины выходных напряжений и токов:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{12} &= U_{12} e^{j\Phi_{1u2}}; \\ \dot{U}_{22} &= U_{22} e^{j\Phi_{2u2}}; \\ \dot{I}_{12} &= I_{12} e^{j\Phi_{1i2}}; \\ \dot{I}_{22} &= I_{22} e^{j\Phi_{2i2}}. \end{aligned} \right\}$$

Предлагаемые опыты для определения укрупненных первичных параметров выполняются без участия потребителей электрической энергии, которые на рис. 2 иллюстрируются резистором Н.

Первый опыт, опыт холостого хода по определению численных значений укрупненных первичных параметров ЛЭП двухпроводного исполнения, выполняется размыканием ключа S2. Ключи S3 и S4 при этом остаются разомкнутыми, а ключ S1 — замкнутым. В этом опыте будут отсутствовать токи на выходе анализируемого шестиполосника:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{12}^{(1)} &= 0; \\ \dot{I}_{22}^{(1)} &= 0. \end{aligned} \right\}$$

В этом опыте с помощью электроизмерительных приборов определяются величины $\dot{U}_{11}^{(1)}$, $\dot{U}_{21}^{(1)}$, $\dot{I}_{11}^{(1)}$, $\dot{I}_{21}^{(1)}$ и $\dot{U}_{12}^{(1)}$, $\dot{U}_{22}^{(1)}$.

Модули этих величин зафиксируют вольтметры PV1, PV2, PV3 и PV4, а также амперметр PA1. Начальные фазы входных напряжений и токов определяются так же, как и в первом опыте — из показаний фазометров $P\phi 1$ и $P\phi 2$. Из-за отсутствия в этом опыте выходных токов фазометры $P\phi 3$, $P\phi 4$, $P\phi 5$ и $P\phi 6$, включенные так, как показано на рис. 2, приобретут нулевые значения и для определения начальных фаз выходных напряжений не годятся.

Для определения начальных фаз напряжений в конце анализируемого однородного участка ЛЭП фазометры $P\phi 3$ и $P\phi 4$, воспользовавшись линиями связи, следует включить по-другому, а именно: токовую обмотку

фазометра $P\phi 3$ переключить в начало первого провода, а токовую обмотку фазометра $P\phi 4$ — в начало второго провода. Обмотки напряжения этих приборов следует оставить в том виде, как это указано на рис. 2. Тогда фазометр $P\phi 3$ покажет разность фаз напряжения в конце и тока — в начале первого провода $\Phi_3 = \Phi_{1u2} - \Phi_{1i1}$, а фазометр $P\phi 4$ — разность фаз напряжения в конце и тока — в начале второго провода $\Phi_4 = \Phi_{2u2} - \Phi_{2i1}$. Эти сведения дают возможность определения начальных фаз напряжений в конце первого провода $\Phi_{1u2} = \Phi_3 + \Phi_{1i1}$ и в конце второго провода $\Phi_{2u2} = \Phi_4 + \Phi_{2i1}$.

По результатам выполнения опыта холостого хода могут быть составлены уравнения:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{11}^{(1)} &= \left[\dot{I}_{11}^{(1)} - \dot{U}_{11}^{(1)} \underline{Y}_{101} - (\dot{U}_{11}^{(1)} - \dot{U}_{21}^{(1)}) \underline{Y}_{121} \right] \underline{Z}_1 + \dot{U}_{12}^{(1)}; \\ \dot{U}_{21}^{(1)} &= \left[\dot{U}_{22}^{(1)} \underline{Y}_{202} + (\dot{U}_{12}^{(1)} - \dot{U}_{22}^{(1)}) \underline{Y}_{122} \right] \underline{Z}_2 + \dot{U}_{22}^{(1)}; \\ \dot{I}_{11}^{(1)} &= \dot{U}_{11}^{(1)} \underline{Y}_{101} + (\dot{U}_{11}^{(1)} - \dot{U}_{21}^{(1)}) \underline{Y}_{121} + \dot{U}_{12}^{(1)} \underline{Y}_{102} + \\ &+ (\dot{U}_{12}^{(1)} - \dot{U}_{22}^{(1)}) \underline{Y}_{122}; \\ \dot{I}_{21}^{(1)} &= \dot{U}_{21}^{(1)} \underline{Y}_{201} - (\dot{U}_{11}^{(1)} - \dot{U}_{21}^{(1)}) \underline{Y}_{121} + \dot{U}_{22}^{(1)} \underline{Y}_{202} - \\ &- (\dot{U}_{12}^{(1)} - \dot{U}_{22}^{(1)}) \underline{Y}_{122}. \end{aligned} \quad (1)$$

Второй опыт предполагает замыкание двух проводов в конце анализируемой ЛЭП на «землю». Это опыт полного короткого замыкания. В этом опыте замкнутыми должны быть ключи S1, S3 и S4, а разомкнутым — ключ S2 (рис. 2). В этом случае будут отсутствовать напряжения в конце первого и второго проводов:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{1n2}^{(2)} &= 0; \\ \dot{U}_{2n2}^{(2)} &= 0. \end{aligned} \right\}$$

Используемые в этом опыте электроизмерительные приборы позволяют определить величины входных и выходных напряжений и токов $\dot{U}_{1n1}^{(2)}$, $\dot{U}_{2n1}^{(2)}$, $\dot{I}_{1n1}^{(2)}$, $\dot{I}_{2n1}^{(2)}$ и $\dot{I}_{1n2}^{(2)}$, $\dot{I}_{2n2}^{(2)}$. Модули этих величин определяют показания вольтметров PV1, PV2 и амперметры PA1, PA2, PA3 (рис. 2). Их начальные фазы определяются из показаний фазометров.

Начальные фазы вращающихся векторов, каковыми являются напряжения и токи, изменяются во времени. Они фиксируются только для какого-либо конкретного момента времени, который исследователь выбирает произвольно.

Нулевые значения напряжений в конце первого и второго проводов обеспечат нулевые показания фазометров $P\phi 3$, $P\phi 4$ и $P\phi 5$ при их включении так, как показано на рис. 2.

Фазометры $P\phi 1$ и $P\phi 2$, как и в предыдущих опытах, позволят определить начальные фазы входных напряжений и токов Φ_{1u1} , Φ_{2u1} , Φ_{1i1} и Φ_{2i1} .

Фазометр $P\phi_6$ регистрирует разность фаз напряжения в начале первого провода и током — в конце этого же провода: $\phi_6 = \phi_{1u1} - \phi_{1i2}$. Этот факт позволит определить начальную фазу тока в конце первого провода: $\phi_{1i2} = \phi_{2u1} - \phi_6$.

Для того чтобы определить начальную фазу напряжения в конце второго провода, необходимо изменить схему включения фазометра $P\phi_4$ или фазометра $P\phi_5$. Пусть это будет фазометр $P\phi_4$. Начало его обмотки напряжения нужно переключить на начало второго провода. Тогда этот фазометр покажет разность фаз напряжения в начале второго провода и тока — в конце этого же провода: $\phi_4 = \phi_{2u1} - \phi_{2i2}$. Начальная фаза тока в конце второго провода определится так: $\phi_{2i2} = \phi_{2u1} - \phi_4$.

Таким образом определяются комплексные значения входных и выходных напряжений и токов.

По результатам этого опыта могут быть получены уравнения:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{11}^{(2)} &= i_{12}^{(2)} \underline{Z}_1; \\ \dot{U}_{21}^{(2)} &= i_{22}^{(2)} \underline{Z}_2; \\ i_{11}^{(2)} &= \dot{U}_{11}^{(2)} \underline{Y}_{101} + (\dot{U}_{11}^{(2)} - \dot{U}_{21}^{(2)}) \underline{Y}_{121} + i_{12}^{(2)}; \\ i_{21}^{(2)} &= \dot{U}_{21}^{(2)} \underline{Y}_{201} - (\dot{U}_{11}^{(2)} - \dot{U}_{21}^{(2)}) \underline{Y}_{121} + i_{12}^{(2)}. \end{aligned} \right\} (2)$$

Третий опыт тоже является опытом неполного короткого замыкания. Он выполняется замыканием ключа S4. Этим действием второй провод ЛЭП двухпроводного исполнения замыкается на «землю». Ключи S2 и S3 при этом должны быть разомкнуты, а ключ S1 — замкнут. Амперметр PA2 и вольтметр PV4 в этом опыте приобретают нулевые значения:

$$\left. \begin{aligned} i_{1n2}^{(3)} &= 0; \\ \dot{U}_{2n2}^{(3)} &= 0. \end{aligned} \right\}$$

Электроизмерительные приборы, участвующие в этом опыте, позволяют определить входные и выходные величины напряжений и токов $\dot{U}_{1n1}^{(3)}$, $\dot{U}_{2n1}^{(3)}$, $i_{1n1}^{(3)}$, $i_{2n1}^{(3)}$ и $\dot{U}_{1n2}^{(3)}$, $i_{2n2}^{(3)}$.

Модули этих величин регистрируют вольтметры PV1, PV2 и PV3, а также амперметры PA1 и PA3. Начальные фазы входных напряжений и токов, как и в первом опыте, определяются из показаний фазометров $P\phi_1$ и $P\phi_2$. Отсутствие тока в конце первого провода и напряжения в конце второго провода обеспечивают нулевые показания фазометров $P\phi_3$, $P\phi_4$ и $P\phi_6$ при их включении так, как показано на рис. 2.

Для того чтобы определить начальную фазу тока в конце второго провода, необходимо, воспользовавшись линиями связи, начало обмотки напряжения фазометра $P\phi_4$ переключить на начало первого провода. При таком включении этот фазометр покажет разность фаз напряжения в начале первого провода и тока — в конце второго провода: $\phi_4 = \phi_{1u1} - \phi_{2i2}$. Из этого показания

можно определить начальную фазу тока в конце второго провода: $\phi_{2i2} = \phi_{1u1} - \phi_4$.

Фазометр $P\phi_5$, как и в первом опыте, регистрирует разность фаз напряжения в конце первого провода и тока — в конце второго провода: $\phi_5 = \phi_{1u2} - \phi_{2i2}$. Эта информация дает возможность определения начальной фазы напряжения в конце первого провода: $\phi_{1u2} = \phi_5 + \phi_{2i2}$.

Так формируются комплексные значения входных и выходных напряжений и токов.

Для определения математических выражений для вычисления укрупненных первичных параметров ЛЭП двухпроводного исполнения по результатам опыта неполного короткого замыкания достаточно сформулировать одно уравнение:

$$\dot{U}_{11}^{(3)} = (\dot{U}_{12}^{(3)} \underline{Y}_{102} + \dot{U}_{12}^{(3)} \underline{Y}_{122}) \underline{Z}_1 + \dot{U}_{12}^{(3)}. \quad (3)$$

Совместное решение уравнений (1) – (3) позволит определить формулы для вычисления комплексных значений укрупненных полных сопротивлений \underline{Z}_1 , \underline{Z}_2 и проводимостей \underline{Y}_{101} , \underline{Y}_{102} , \underline{Y}_{201} , \underline{Y}_{202} , \underline{Y}_{121} , \underline{Y}_{122} :

$$\underline{Z}_1 = \frac{\dot{U}_{11}^{(2)}}{i_{12}^{(2)}};$$

$$\underline{Z}_2 = \frac{\dot{U}_{21}^{(2)}}{i_{22}^{(2)}};$$

$$\underline{Y}_{121} = \frac{\dot{U}_{11}^{(1)} \dot{U}_{11}^{(2)} - i_{11}^{(1)} \dot{U}_{11}^{(2)} \underline{Z}_1 + \dot{U}_{11}^{(1)} i_{11}^{(2)} \underline{Z}_1 - \dot{U}_{11}^{(1)} i_{12}^{(2)} \underline{Z}_1 - \dot{U}_{12}^{(1)} \dot{U}_{11}^{(2)}}{\dot{U}_{11}^{(1)} (\dot{U}_{11}^{(2)} - \dot{U}_{21}^{(2)}) \underline{Z}_1 - (\dot{U}_{11}^{(1)} - \dot{U}_{21}^{(1)}) \dot{U}_{11}^{(2)} \underline{Z}_1}$$

$$\underline{Y}_{101} = \frac{i_{11}^{(2)} - (\dot{U}_{11}^{(2)} - \dot{U}_{21}^{(2)}) \underline{Y}_{121} - i_{12}^{(2)}}{\dot{U}_{11}^{(2)}};$$

$$\underline{Y}_{201} = \frac{i_{21}^{(2)} + (\dot{U}_{11}^{(2)} - \dot{U}_{21}^{(2)}) \underline{Y}_{121} - i_{22}^{(2)}}{\dot{U}_{21}^{(2)}};$$

$$\begin{aligned} \underline{Y}_{102} &= \frac{(\dot{U}_{12}^{(1)} - \dot{U}_{22}^{(1)}) \dot{U}_{11}^{(3)} - (\dot{U}_{12}^{(1)} - \dot{U}_{22}^{(1)}) \dot{U}_{12}^{(3)} - i_{11}^{(1)} \dot{U}_{12}^{(3)} \underline{Z}_1 + \rightarrow \\ &\rightarrow \frac{+ \dot{U}_{11}^{(1)} \dot{U}_{12}^{(3)} \underline{Z}_1 \underline{Y}_{101} + (\dot{U}_{12}^{(1)} - \dot{U}_{22}^{(1)}) \dot{U}_{12}^{(3)} \underline{Z}_1 \underline{Y}_{121}}{- \dot{U}_{21}^{(1)} \dot{U}_{12}^{(3)} \underline{Z}_1}; \end{aligned}$$

$$\underline{Y}_{122} = \frac{i_{11}^{(1)} - \dot{U}_{11}^{(1)} \underline{Y}_{101} - (\dot{U}_{11}^{(1)} - \dot{U}_{21}^{(1)}) \underline{Y}_{122} - \dot{U}_{12}^{(2)} \underline{Y}_{102}}{(\dot{U}_{12}^{(1)} - \dot{U}_{22}^{(1)})} =$$

$$= \frac{\dot{U}_{11}^{(3)} - \dot{U}_{12}^{(3)} \underline{Z}_1 \underline{Y}_{102} - \dot{U}_{12}^{(3)}}{\dot{U}_{12}^{(3)} \underline{Z}_1};$$

$$\underline{Y}_{202} = \frac{\dot{U}_{21}^{(1)} - (\dot{U}_{12}^{(1)} - \dot{U}_{22}^{(1)}) \underline{Z}_2 \underline{Y}_{121} - \dot{U}_{22}^{(1)}}{\dot{U}_{22}^{(1)} \underline{Z}_2}.$$

Вещественные составляющие укрупненных полных сопротивлений проводов определяют укрупненные активные сопротивления этих проводов:

$$R_1 = \operatorname{Re}(Z_1);$$

$$R_2 = \operatorname{Re}(Z_2).$$

Мнимые составляющие укрупненных полных сопротивлений определяют укрупненные индуктивности проводов:

$$L_1 = \frac{\operatorname{Im}(Z_1)}{2\pi f};$$

$$L_2 = \frac{\operatorname{Im}(Z_2)}{2\pi f},$$

где f — частота изменения напряжения во времени.

Причем в укрупненных индуктивностях L_1 и L_2 учитываются собственные и взаимные индуктивности проводов ЛЭП, то есть учитываются явления самоиндукции и взаимной индукции.

Укрупненные активные проводимости между проводами и заземленными конструкциями ЛЭП определяются вещественными составляющими укрупненных полных проводимостей \underline{Y}_{10} и \underline{Y}_{20} :

$$G_{101} = \operatorname{Re}(\underline{Y}_{101});$$

$$G_{102} = \operatorname{Re}(\underline{Y}_{102});$$

$$G_{201} = \operatorname{Re}(\underline{Y}_{201});$$

$$G_{202} = \operatorname{Re}(\underline{Y}_{202}).$$

Укрупненные емкости между проводами и заземленными конструкциями ЛЭП определяются мнимыми составляющими этих проводимостей:

$$C_{101} = \frac{\operatorname{Im}(\underline{Y}_{101})}{2\pi f};$$

$$C_{102} = \frac{\operatorname{Im}(\underline{Y}_{102})}{2\pi f};$$

$$C_{201} = \frac{\operatorname{Im}(\underline{Y}_{201})}{2\pi f};$$

$$C_{202} = \frac{\operatorname{Im}(\underline{Y}_{202})}{2\pi f}.$$

Укрупненные активные проводимости между проводами исследуемой ЛЭП определяются вещественной составляющей укрупненной полной проводимости \underline{Y}_{121} и \underline{Y}_{122} :

$$G_{121} = \operatorname{Re}(\underline{Y}_{121});$$

$$G_{122} = \operatorname{Re}(\underline{Y}_{122}).$$

Укрупненная емкость между проводами определяется мнимой составляющей этих же проводимостей:

$$C_{121} = \frac{\operatorname{Im}(\underline{Y}_{121})}{2\pi f};$$

$$C_{122} = \frac{\operatorname{Im}(\underline{Y}_{122})}{2\pi f}.$$

Так определяются укрупненные первичные параметры ЛЭП двухпроводного исполнения, которые могут быть использованы для вычисления укрупненных вторичных ЛЭП двухпроводного исполнения, для оценивания пропускной способности линии электропередачи и при анализе результатов передачи электрической энергии потребителям.

Вывод

Данный метод экспериментального определения укрупненных первичных параметров двухпроводной ЛЭП позволяет контролировать эксплуатационные изменения этих параметров в действующих линиях электропередачи. Метод может быть использован при формировании исходных данных для прогнозирования результатов передачи электрической энергии по двухпроводным ЛЭП.

Литература

1. Электротехнический справочник в 4-х т. Т. 3. Производство, передача и распределение электрической энергии / под общ. ред. В.Г. Герасимова. 9-е изд., стер. М.: Изд-во МЭИ, 2004. 964 с.
2. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию промышленных предприятий и общественных зданий / под общ. ред. С.И. Гамазина, Б.И. Кудрина, С.А. Цырука. М.: ИД МЭИ, 2010. 745 с.
3. Большанин Г.А. Распределение электрической энергии по участкам электроэнергетических систем: моногр. В 2-х кн. Братск: БрГУ, 2006. Кн. 1. 807 с.
4. Рыжов Ю.П. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения. М.: ИД МЭИ, 2007. 488 с.
5. Большанин Г.А. Распределение электрической энергии пониженного качества по участкам электроэнергетических систем // Труды Братского государственного университета. Сер. Естественные и инженерные науки. 2006. Т. 2. С. 129-140.
6. Иоссель Ю.Я., Кочанов Э.С., Струнский М.Г. Расчет электрической емкости. Л.: Энергоатомиздат, 1986. 288 с.
7. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей: справ. книга. Л.: Энергоатомиздат, 1986. 488 с.
8. Шелюк С.Н., Суворов А.А. Определение параметров схемы замещения ЛЭП с учетом поперечной проводимости // Материалы шестой Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: экология, надежность, безопасность». Томск, 2000. Т. 1. С. 39-41.
9. Youssef Omar A.S. A fundamental digital approach to impedance relays // IEEE Trans. Power. Deliv. 1992. Vol. 7, № 4. P. 1861-1866.
10. Elkateb M.M. Seen impedance by impedance type relays during power system sequential disturbances // IEEE Trans. Power. Deliv. 1992. Vol. 7, № 4. P. 1946-1952.
11. Eammon D., Morisson R. New technique is developed to determine harmonic impedance // Transmiss and Distrieb. Int., 1992. Vol. 3, № 2. P. 32-34.

12. Bolatka J. Pridavne ztrati v elektrizačni soustavě vlivem frekvenční závislosti pasivních odporů // Bull. EGU. 1986. Vol. 97. P. 48-56.

13. Bergeal J., Moller L. Analysis of the spectrum impedance of a network use of digital methods // CIRED-1983: 7th Int. Conf. Elec. Distrieb., Liege, 25-29 Apr., 1983. Pt.1. Liege, 1983. CO5/1-CO5/6.

14. Кротков И.Н. Точные измерения электрической емкости и индуктивности. Схемы, методы, эталоны. М.: Стандартиздат, 1966. 272 с.

15. Кузнецов Ф.Н., Каган В.Г., Малаян Н.Р. Электрические параметры сталеалюминиевых проводов на промышленной частоте и на высоких // Изв. АН СССР. Сер. Энергетика и транспорт. 1968. № 3. С. 33-46.

16. Кадомская К.И. О статье Г.А. Большанина «Распределение электрической энергии пониженного качества по однородному трехфазному трехпроводному участку воздушной ЛЭП» // Научный вестник НГТУ. 2009. № 4 (37). С. 203-204.

17. Большанин Г.А., Большанина Л.Ю. Определение первичных параметров однородного участка двухпроводной линии электропередачи // Энергобезопасность и энергосбережение. 2015. № 3 С. 5-9.

18. Мельников Н.А., Рокотян С.С., Шеренцис А.Н. Проектирование электрической части воздушной линии электропередачи 330-500Кв. 2-е изд. перераб. и доп. М.: Энергия, 1974. 472 с.

19. Большанин Г.А., Большанина Л.Ю., Марьясова Е.Г. Методика определения первичных параметров однородного участка двухпроводной линии электропередачи // Электротехнические комплексы и системы управления. 2015. № 2 (38). С. 18-23.

20. Большанин Г.А., Большанина Л.Ю. Определение первичных параметров однородного участка двухпроводной линии электропередачи // Энергобезопасность и энергосбережение. 2015. № 3.С. 5-9.

21. Большанин Г.А. Передача электрической энергии по ЛЭП одно-, двух- и трехпроводного исполнения. Братск: Изд-во БрГУ, 2016. 313 с.

22. Большанин Г.А., Большанина Л.Ю. Параметры трехпроводной ЛЭП. Метод восьмиполосника: моногр. Братск, 2013. 265 с.

23. Большанин Г.А., Большанина Л.Ю. Определение укрупненных вторичных параметров трехпроводной линии электропередачи методом восьмиполосника // Электротехнические комплексы и системы управления. 2013. № 4 (32). С. 45-49.

24. Большанин Г.А., Большанина Л.Ю. Использование теории восьмиполосника для анализа электропередачи // LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG Heinrich-Böcking-Str. 6-8, 66121 Saarbrücken, Germany. Saarbrücken, 2014. P.145.

25. Большанин Г.А., Большанина Л.Ю., Марьясова Е.Г. Способ определения укрупненных первичных параметров двухпроводной линии электропередачи // Наука и образование в жизни современного общества: сб. науч. тр. по материалам междунар. науч.-практической конф. 30 дек. 2014 г. Тамбов, 2015. С. 8-11.

26. Большанин Г.А., Большанина Л.Ю., Марьясова Е.Г. Косвенное измерение укрупненных первичных параметров двухпроводной линии электропередачи // Измерительная техника. 2016. № 5. С. 50-52.

27. Большанин Г.А., Большанина Л.Ю., Марьясова Е.Г. Способ определения количественной связи между входными и выходными напряжениями и токами двухпроводной линии

электропередачи методом шестиполосника // Магнитолевитационные транспортные системы и технологии: сб. материалов 2-й междунар. конф. С.-Петерб. гос. ун-т путей сообщения, 17-20 июня 2014 г. Киров, 2014. С. 323-336.

28. Bolshanin G.A., Bolshanina L. Yu., Maryasova E.G. Experimental determination of coefficients six-pole network // Science and Education: materials of the VI international research and practice conference, Munich, June 27th – 28th, 2014 / publishing office Vela Verlag Waldkraiburg – Munich, 2014. P. 447-452. Germany.

29. Большанин Г.А., Большанина Л.Ю. Особенности распространения электрической энергии по линии электропередачи. Братск: Изд-во БрГУ, 2011. 64 с.

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

31. Большанин Г.А., Большанина Л.Ю., Марьясова Е.Г. Особенности распространения электрической энергии по многопроводным линиям электропередачи // Труды Братского государственного университета. Сер. Естественные и инженерные науки. 2011. Т. 2. С. 38-43.

References

1. The electrotechnical reference book in 4 t. T.3, Production, transfer and distribution of an electrical energy / pod obshch. red. V.G. Gerasimova. 9-e izd., ster. M.: Izd-vo MEI, 2004. 964 p.

2. Reference book on power supply and electric equipment of industrial enterprises and public buildings / pod obshch. red. S.I. Gamazina, B.I. Kudrina, S.A. Tsyruka. M.: ID MEI, 2010. 745 p.

3. Bol'shanin, G.A. Distribution of an electrical energy on sites of electrical power systems: monogr. V 2-kh kn. Bratsk: BrGU, 2006. Kn. 1. 807 p.

4. Ryzhov Yu.P. Distant electricity transmissions of ultrahigh tension. M.: ID MEI, 2007. 488 p.

5. Bol'shanin G.A. Distribution of an electrical energy of the lowered quality on sites of electrical power systems // Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Estestvennye i inzhenernye nauki. 2006. T. 2. P. 129-140.

6. Iossel' Yu.Ya., Kochanov E.S., Strunskii M.G. Calculation of electric reservoir. L.: Energoatomizdat, 1986. 288 p.

7. Kalantarov P.L., Tseitlin L.A. Calculation of inductance: sprav. kniga. L.: Energoatomizdat, 1986. 488 p.

8. Shelyuk S.N., Suvorov A.A. Determination of parameters of the scheme of replacement of the high voltage line taking into account cross conductivity // Materialy shestoi Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Energetika: ekologiya, na-dezhnost', bezopasnost'». Tomsk, 2000. T. 1. P. 39-41.

9. Youssef Omar A.S. A fundamental digital approach to impedance relays // IEEE Trans. Power. Deliv. 1992. Vol. 7, № 4. P. 1861-1866.

10. Elkateb M.M. Seen impedance by impedance type relays during power system sequential disturbances // IEEE Trans. Power. Daliv. 1992. Vol. 7, № 4. P. 1946-1952.

11. Eammon D., Morisson R. New technique is developed to determine harmonic impedance // Transmiss and Distrieb. Int., 1992. Vol. 3, № 2. P. 32-34.

12. Bolatka J. Pridavne ztrati v elektrizačni soustavě vlivem frekvenční závislosti pasivních odporů // Bull. EGU. 1986. Vol.97. P. 48-56.

13. Bergeal J., Moller L. Analysis of the spectrum impedance of a network use of digital methods // CIRED-1983: 7th Int. Conf. Elec. Distrieb., Liege, 25-29 Apr., 1983. Pt.1. Liege, 1983. CO5/1-CO5/6.

14. Krotkov I.N. Exact measurements of electric reservoir and inductance. Schemes, methods, standards. M.: Standartizdat, 1966. 272 p.
15. Kuznetsov F.N., Kagan V.G., Malayan N.R. Electric parameters of steel-aluminum wires at an industrial frequency and on high // *Izv. AN SSSR. Ser. Energetika i transport.* 1968. № 3. P. 33-46.
16. Kadomskaya K.I. About G.A. Bolshinin's article "Distribution of an electrical energy of the lowered quality on a uniform three-phase three-wire site of the air high voltage line" // *Scientific Bulletin of NSTU.* 2009. № 4 (37). P. 203-204.
17. Bol'shanin G.A., Bol'shanina L.Yu. Determination of primary parameters of a uniform site of a two-wire power line // *Energy Safety and Energy Economy (Energobezопасnost' i Energoberezhenie).* 2015. № 3. P. 5-9.
18. Mel'nikov N.A., Rokotyan S.S., Sherentsis A.N. Designing of electric part of an air-line of an electricity transmission 330-500kv. 2-e izd. pererab. i dop. M.: Energiya, 1974. 472 p.
19. Bol'shanin G.A., Bol'shanina L.Yu., Mar'yasova E.G. Method of determination of primary parameters of a uniform site of a two-wire power line // *Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy upravleniya.* 2015. № 2 (38). P. 18-23.
20. Bol'shanin G.A., Bol'shanina L.Yu. Determination of primary parameters of a uniform site of a two-wire power line // *Energy Safety and Energy Economy (Energobezопасnost' i Energoberezhenie).* 2015. № 3. P. 5-9.
21. Bol'shanin G.A. Transfer of an electrical energy on the high voltage line one - two - and three-wire execution. Bratsk: Izd-vo BrGU, 2016. 313 p.
22. Bol'shanin G.A., Bol'shanina L.Yu. Parameters of the three-wire high voltage line. Eight-pole method: monogr. Bratsk, 2013. 265 p.
23. Bol'shanin G.A., Bol'shanina L.Yu. Determination of the integrated secondary parameters of a three-wire power line by an eight-pole method // *Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy upravleniya.* 2013. № 4 (32). P. 45-49.
24. Bol'shanin G.A., Bol'shanina L.Yu. Use of the theory of an eight-pole for the analysis of an electricity transmission // LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG Heinrich-Böcking-Str. 6-8, 66121 Saarbrücken, Germany. Saarbrücken, 2014. P. 145.
25. Bol'shanin G.A., Bol'shanina L.Yu., Mar'yasova E.G. Method of determination of the integrated primary parameters of a two-wire power line // *Nauka i obrazovanie v zhizni sovremenno-go obshchestva: sb. nauch. tr. po materialam mezhdunar. nauch.-prakticheskoi konf. 30 dek. 2014 g. Tambov,* 2015. P. 8-11.
26. Bol'shanin G.A., Bol'shanina L.Yu., Mar'yasova E.G. Indirect measurement of the integrated primary parameters of a two-wire power line // *Measurement Techniques.* 2016. № 5. P. 50-52.
27. Bol'shanin G.A., Bol'shanina L.Yu., Mar'yasova E.G. Method of definition of quantitative communication between the entrance and output tension and currents of a two-wire power line by a six-pole network method // *Magnitolevitatsionnye transportnye sistemy i tekhnologii: sb. materialov 2-i mezhdunar. konf. S.-Peterb. gos. un-t putei soobshcheniya, 17-20 iyunya 2014 g. Kirov,* 2014. P. 323-336.
28. Bol'shanin G.A., Bol'shanina L.Yu., Maryasova E.G. Experimental determination of coefficients six-pole network // *Science and Education: materials of the VI internationals research and practice conference, Munich, June 27th - 28th, 2014 / publishing office Vela Verlag Waldkraiburg - Munich,* 2014. P. 447-452. Germany.
29. Bol'shanin G.A., Bol'shanina L.Yu. Features of distribution of electric energy on a power line. Bratsk: Izd-vo BrGU, 2011. 64 p.
30. Kostenko M.V., Perel'man A.S., Shkarin Yu.P. Wave processes and electric hindrances in multiwire lines of a high voltage. M.: Energiya, 1973. 272 p.
31. Bol'shanin G.A., Bol'shanina L.Yu., Mar'yasova E.G. Features of distribution of electric energy on multiwire power lines // *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Estestvennye i inzhenernye nauki.* 2011. T. 2. P. 38-43.