

Косвенное измерение укрупнённых первичных параметров двухпроводной линии электропередачи

Г. А. БОЛЬШАНИН, Л. Ю. БОЛЬШАНИНА, Е. Г. МАРЬЯСОВА

Братский государственный университет, Братск, Россия, e-mail: brstu@bk.ru

Предложен способ определения укрупнённых первичных параметров двухпроводной линии электропередачи по результатам измерений токов, напряжений и разности их фаз при выполнении двух опытов — холостого хода и неполного короткого замыкания. Такой подход к проблеме прогнозирования результатов передачи электрической энергии может оказаться перспективным при надлежащем техническом обеспечении серии необходимых экспериментов.

Ключевые слова: двухпроводная линия электропередачи, укрупнённые параметры, опыты холостого хода и неполного короткого замыкания.

A method is proposed for determining the integrated primary parameters based on measurement results of currents, voltages, and the difference between their phases when performing two kinds of experiments: in idling condition and partial short circuit. This approach to the forecasting of the results of electric power transmission may be quite promising, provided a required technical support for a series of experiments is ensured.

Key words: two-wire power transmission line, integral parameters, open circuit parameters, partial short circuit.

Традиционно для определения первичных параметров линии электропередачи (ЛЭП) используют справочную литературу, например [1, 2]. Однако в этом случае не учитываются региональные условия и конструктивные особенности ЛЭП. Факторы, влияющие на первичные параметры ЛЭП, можно учесть аналитическим путём, опираясь на современные теоретические разработки [1—7]. При этом применяют математические формулы, основанные на теории электромагнитного поля, которые достаточно громоздки и не позволяют охватить все влияющие факторы, а именно: изменение химического состава материала линейных проводов, поверхностный эффект, эффект близости, климатические условия, рельеф местности, модификация опор и т. п. Экспериментальное определение первичных параметров тоже весьма трудоёмкий процесс [8, 9].

Предлагаемый способ определения первичных параметров ЛЭП основан на теории многополюсников. Действующую двухпроводную линию представляют единым шестиполюсником с Г-образной схемой замещения (рис. 1), включающей совокупность однородных участков с сопутствующей линейной арматурой [3]. Укрупнёнными (обобщёнными) первичными параметрами анализируемой ЛЭП можно считать следующие: R_1, L_1, R_2, L_2 — активные сопротивления и индуктивности проводов; $G_{10}, C_{10}, G_{20}, C_{20}$ — активные проводимости и ёмкости между проводами и заземлёнными конструктивными элементами; G_{12}, C_{12} — активные проводимость и ёмкость, которые характеризуют электромагнитные связи между линейными проводами. При этом учитываются практически все региональные и конструктивные особенности монтажа и эксплуатации ЛЭП.

С использованием двух источников синусоидального напряжения промышленной частоты выполняют серию экспериментов на основе двух опытов — холостого хода и неполного короткого замыкания. В результате определяют изображения на комплексной плоскости среднеквадратичных значений (СКЗ) входных и выходных напряжений и токов. Они являются исходными данными для расчёта указанных укрупнённых первичных параметров двухпроводной линии. При выполнении экспериментов необходимо обеспечить надёжную информационную связь между входом шестиполюсника (началом исследуемого участка ЛЭП) и его выходом (конец участка). Протяжённость участка может достигать десятков километров. Сигнал, доставляющий информацию от начала до конца участка или наоборот, не должен быть искажён. Для этой цели следует применять специальные технологии, основанные, например, на использовании оптоволокон.

На рис. 2 изображена схема экспериментальной установки, содержащей два источника электрической энергии $\dot{E}_1, \dot{E}_2$ ограниченной мощности, четыре вольтметра $PV1—PV4$, четыре амперметра $PA1—PA4$, семь фазометров $P\phi 1—P\phi 7$

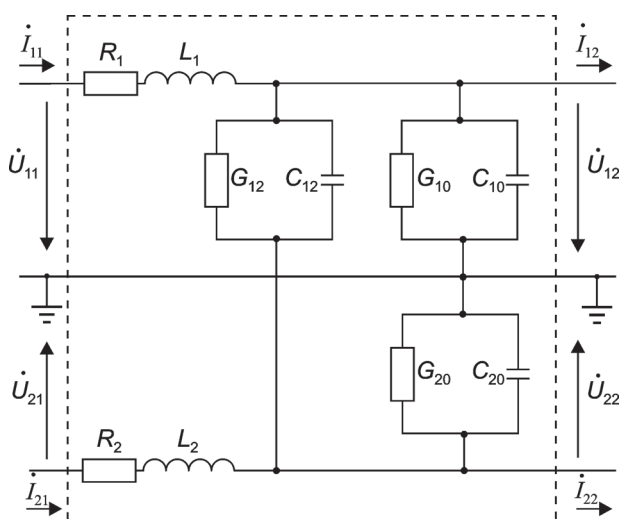


Рис. 1. Г-образная схема замещения двухпроводной ЛЭП

и шесть коммутационных устройств в виде ключей $S1—S6$. Чтобы подключить измерительные обмотки фазометра, установленного в конце анализируемой ЛЭП, её провода используют для связи с началом линии. В качестве электрических нагрузок $H1, H2$ могут служить обычные резисторы или любая другая однофазная нагрузка.

Укрупнённые первичные параметры исследуемой ЛЭП представлены здесь параметрами схемы замещения шестиполюсника в виде полных сопротивлений $\underline{Z}_1, \underline{Z}_2$ и проводимостей $\underline{Y}_{10}, \underline{Y}_{20}, \underline{Y}_{12}$:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_1 &= R_1 + j\omega L_1; \quad \underline{Z}_2 = R_2 + j\omega L_2; \\ \underline{Y}_{10} &= G_{10} + j\omega C_{10}; \quad \underline{Y}_{20} = G_{20} + j\omega C_{20}; \\ \underline{Y}_{12} &= G_{12} + j\omega C_{12}. \end{aligned}$$

Вольтметры $PV1, PV2$ и амперметры $PA1, PA2$ регистрируют модули напряжений U_{11}, U_{21} и токов I_{11}, I_{21} на входе шестиполюсника (см. рис. 1). Начальные фазы этих величин определяют из показаний фазометров $P\phi1—P\phi3$ (см. рис. 2). Пусть начальная фаза одного из входных напряжений, например U_{11} , известна: $\varphi_{1u1} = 0$. Тогда фазометр $P\phi1$ фиксирует разность фаз между напряжением и током в начале первого провода, т. е. $\varphi_1 = -\varphi_{1i1}$. При сфазированных источниках электрической энергии, когда $\varphi_{1u1} = \varphi_{2u1} = 0$, отрицательное значение начальной фазы тока в начале второго провода определяется показаниями фазометра $P\phi2$ и необходимостью в фазометре $P\phi3$ отпадает. В противном случае фазометр $P\phi3$ необходим. Он регистрирует разность фаз напряжения в начале первого провода и тока в начале второго провода: $\varphi_3 = \varphi_{1u1} - \varphi_{2u1}$, но поскольку $\varphi_{1u1} = 0$, получим $\varphi_3 = -\varphi_{2i1}$.

Фазометр $P\phi2$ регистрирует разность начальных фаз напряжения и тока в начале второго провода: $\varphi_2 = \varphi_{2u1} - \varphi_{2i1}$. Это значит, что появилась возможность определения начальной фазы напряжения в начале второго провода: $\varphi_{2u1} = \varphi_2 + \varphi_{2i1}$.

Таким образом находим комплексные значения входных напряжений и токов:

$$\dot{U}_{11} = U_{11} e^{j\varphi_{1u1}}; \quad \dot{U}_{21} = U_{21} e^{j\varphi_{2u1}}; \quad \dot{I}_{11} = I_{11} e^{j\varphi_{1i1}}; \quad \dot{I}_{21} = I_{21} e^{j\varphi_{2i1}}.$$

Вольтметры $PV3, PV4$ регистрируют модули напряжений U_{12}, U_{22} в конце первого и второго проводов анализируемого участка ЛЭП, а амперметры $PA3, PA4$ — модули токов в I_{12}, I_{22} в конце тех же проводов. Для определения их начальных фаз следует использовать показания четырех фазометров $P\phi4—P\phi7$. Фазометр $P\phi7$ устанавливает связь между входными и выходными характеристиками электрической энергии. Его токовая измерительная обмотка включена в разъём конца первого провода, а измерительная обмотка напряжения через линию связи подсоединена к началу первого провода анализируемого однородного участка ЛЭП так, как показано на рис. 2. При таком соединении фазометр $P\phi7$ регистрирует разность начальных фаз напряжения в начале первого провода и тока в конце этого же провода:

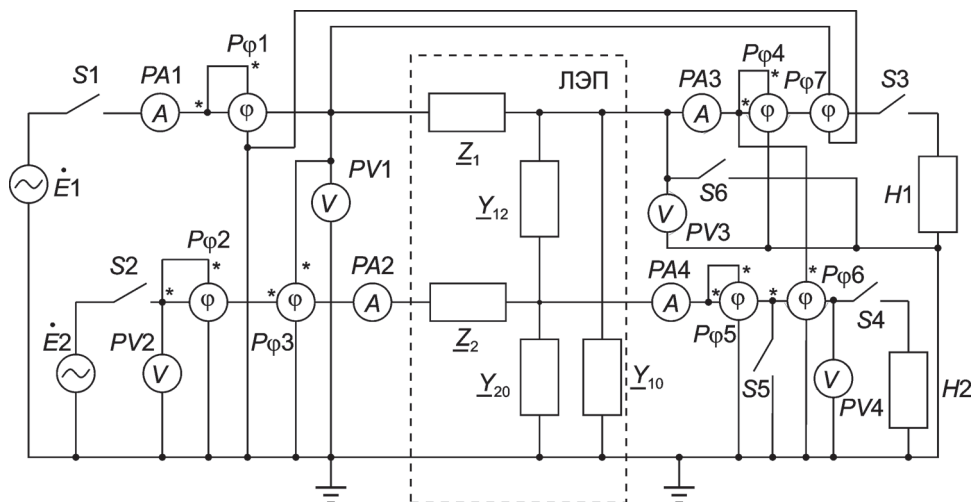


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для определения укрупнённых первичных параметров двухпроводной ЛЭП

$\varphi_7 = \varphi_{1u1} - \varphi_{1i2}$, а при $\varphi_{1u1} = 0$ получим $\varphi_7 = -\varphi_{1i2}$. Фазометр $P\phi4$ показывает разность начальных фаз напряжения и тока в конце первого провода однородного участка ЛЭП: $\varphi_4 = \varphi_{1u2} - \varphi_{1i2}$, откуда $\varphi_{1u2} = \varphi_4 + \varphi_{1i2}$. Фазометр $P\phi6$ при подключении его измерительных обмоток так, как показано на рис. 2, регистрирует разность начальных фаз напряжения в конце первого провода и тока в конце второго провода: $\varphi_6 = \varphi_{1u2} - \varphi_{2i2}$, тогда $\varphi_{2i2} = \varphi_{1u2} - \varphi_6$. Фазометр $P\phi5$ регистрирует разницу начальных фаз напряжения и тока в конце второго провода $\varphi_5 = \varphi_{2u2} - \varphi_{2i2}$, откуда $\varphi_{2u2} = \varphi_5 + \varphi_{2i2}$.

Теперь есть возможность найти комплексные значения выходных напряжений и токов:

$$\dot{U}_{12} = U_{12} e^{j\varphi_{1u2}}; \quad \dot{U}_{22} = U_{22} e^{j\varphi_{2u2}}; \quad \dot{I}_{12} = I_{12} e^{j\varphi_{1i2}}; \quad \dot{I}_{22} = I_{22} e^{j\varphi_{2i2}}.$$

Предлагаемые опыты выполняют без участия потребителей электрической энергии, хотя на рис. 2 они представлены резисторами $H1, H2$.

Опыт холостого хода выполняют при разомкнутых ключах $S3—S6$ (см. рис. 2) и замкнутых $S1, S2$. При этом вольтметры $PV1, PV2$ измеряют модули входных $U_{11}^{(1)}, U_{21}^{(1)}$, а вольтметры $PV3, PV4$ модули выходных $U_{12}^{(1)}, U_{22}^{(1)}$ напряжений холостого хода. Амперметры $PA1, PA2$ зарегистрируют модули токов холостого хода $I_{11}^{(1)}, I_{21}^{(1)}$, а амперметры $PA3, PA4$ в этом опыте будут иметь нулевые показания: $I_{12}^{(1)} = 0$ и $I_{22}^{(1)} = 0$. Начальные фазы входных напряжений и токов определяют фазометры $P\phi1—P\phi3$. Из-за отсутствия выходных токов в этом опыте фазометры $P\phi4—P\phi7$ имеют нулевые показания.

Воспользовавшись линиями связи для определения начальных фаз напряжений в конце анализируемой ЛЭП фазометры $P\phi4, P\phi5$ следует включить по-другому, а именно: токовую обмотку фазометра $P\phi4$ соединить с началом первого провода, а токовую обмотку фазометра $P\phi5$ в начало второго провода. Обмотки напряжения этих приборов включены так, как изображено на рис. 2. Тогда фазометр $P\phi4$ покажет разность фаз напряжения в конце и тока в начале

первого провода $\varphi_4 = \varphi_{1u2} - \varphi_{1i1}$, а фазометр $P\varphi 5$ — разность фаз напряжения в конце и тока в начале второго провода $\varphi_5 = \varphi_{2u2} - \varphi_{2i1}$, что позволит найти $\varphi_{1u2} = \varphi_4 + \varphi_{1i1}$, $\varphi_{2u2} = \varphi_5 + \varphi_{2i2}$.

По результатам выполнения опыта холостого хода можно составить следующие уравнения:

$$\dot{U}_{11}^{(1)} = \dot{I}_{11}^{(1)} Z_1 + \dot{U}_{12}^{(1)}; \quad (1)$$

$$\dot{U}_{21}^{(1)} = \dot{I}_{21}^{(1)} Z_2 + \dot{U}_{22}^{(1)}; \quad (2)$$

$$\dot{I}_{11}^{(1)} - \dot{U}_{12}^{(1)} Y_{10} - (\dot{U}_{12}^{(1)} - \dot{U}_{22}^{(1)}) Y_{12} = 0; \quad (3)$$

$$\dot{I}_{21}^{(1)} - \dot{U}_{22}^{(1)} Y_{20} + (\dot{U}_{12}^{(1)} - \dot{U}_{22}^{(1)}) Y_{12} = 0. \quad (4)$$

Из (1), (2) получаем укрупнённые полные сопротивления проводов

$$Z_1 = (\dot{U}_{11}^{(1)} - \dot{U}_{12}^{(1)}) / \dot{I}_{11}^{(1)}; Z_2 = (\dot{U}_{21}^{(1)} - \dot{U}_{22}^{(1)}) / \dot{I}_{21}^{(1)}.$$

Для определения комплексных значений укрупнённых полных проводимостей, представляющих поперечные параметры ЛЭП, уравнений (1)–(4) недостаточно. Их можно дополнить в результате проведения второго опыта.

Опыт неполного короткого замыкания выполняется при замыкании ключа S_6 . Таким образом первый провод анализируемого участка ЛЭП заземляется. Ключи S_3 – S_5 разомкнуты, а S_1 , S_2 по-прежнему замкнуты. Вольтметр PV_3 и амперметр PA_4 имеют нулевые показания: $\dot{U}_{12}^{(2)} = 0$; $\dot{I}_{22}^{(1)} = 0$.

В этом опыте находят входные и выходные напряжения и токи: $\dot{U}_{11}^{(2)}$, $\dot{U}_{21}^{(2)}$, $\dot{I}_{11}^{(2)}$, $\dot{I}_{21}^{(2)}$ и $\dot{U}_{22}^{(2)}$, $\dot{I}_{12}^{(2)}$. Их модули регистрируют вольтметры PV_1 , PV_2 , PV_4 и амперметры PA_1 , PA_2 , PA_3 . Начальные фазы входных напряжений и токов определяют фазометры $P\varphi 1$ – $P\varphi 3$. Нулевым значениям напряжения в конце первого провода и тока в конце второго провода соответствуют нулевые показания фазометров $P\varphi 4$ – $P\varphi 6$. Фазометр $P\varphi 7$ регистрирует, как и в первом опыте, разность фаз $\varphi_7 = \varphi_{1u1} - \varphi_{1i2}$, откуда $\varphi_{1i2} = \varphi_{1u1} - \varphi_7$. Чтобы определить начальную фазу напряжения в конце второго провода необходимо начало обмотки напряжения фазометра $P\varphi 4$ переключить на конец второго провода. Тогда получим $\varphi_4 = \varphi_{2u2} - \varphi_{1i2}$, откуда $\varphi_{2u2} = \varphi_4 + \varphi_{1i2}$.

По результатам опыта неполного короткого замыкания можно составить уравнение

$$\dot{I}_{21}^{(2)} + \dot{U}_{22}^{(2)} (Y_{12} - Y_{20}) = 0.$$

Решим его совместно с (3), (4):

$$Y_{20} = \dot{I}_{21}^{(1)} \dot{U}_{22}^{(2)} - (\dot{U}_{12}^{(1)} - \dot{U}_{22}^{(1)}) \dot{I}_{21}^{(2)} / \dot{U}_{22}^{(1)} \dot{U}_{22}^{(2)} + \dot{U}_{22}^{(2)} (\dot{U}_{12}^{(1)} - \dot{U}_{22}^{(1)});$$

$$Y_{10} = [\dot{I}_{11}^{(1)} - (\dot{U}_{12}^{(1)} - \dot{U}_{22}^{(1)}) Y_{12}] / \dot{U}_{12}^{(1)}; Y_{12} = Y_{20} + \dot{I}_{21}^{(2)} / \dot{U}_{22}^{(2)}.$$

Вещественные и мнимые составляющие укрупнённых полных сопротивлений определяют укрупнённые активные сопротивления и индуктивности проводов $R_1 = \text{Re}(Z_1)$; $R_2 = \text{Re}(Z_2)$;

$$L_1 = \text{Im}(Z_1) / (2\pi f); L_2 = \text{Im}(Z_2) / (2\pi f), \text{ где } f \text{ — частота изме-}$$

нения напряжения во времени. В L_1 , L_2 учтены собственные и взаимные индуктивности проводов ЛЭП, т. е. явления самоиндукции и взаимоиндукции.

Вещественные и мнимые составляющие укрупнённых полных проводимостей Y_{10} , Y_{20} определяют укрупнённые активные проводимости между проводами и заземлёнными конструкциями ЛЭП: $G_{10} = \text{Re}(Y_{10})$; $G_{20} = \text{Re}(Y_{20})$; $C_{10} = \text{Im}(Y_{10}) / (2\pi f)$; $C_{20} = \text{Im}(Y_{20}) / (2\pi f)$.

Вещественная и мнимая составляющие укрупнённой полной проводимости Y_{12} определяют укрупнённые активную проводимость и ёмкость между проводами исследуемой ЛЭП: $G_{12} = \text{Re}(Y_{12})$; $C_{12} = \text{Im}(Y_{12}) / (2\pi f)$.

Таким образом, полученные укрупнённые первичные параметры ЛЭП двухпроводного исполнения можно использовать для вычисления её укрупнённых вторичных параметров, оценивания пропускной способности линии и анализа результатов передачи электрической энергии потребителям. Правомочность и достоверность этого способа обеспечиваются выбором соответствующих пределов и классов точности электроизмерительных приборов. Оперативность и достоверность аналитической обработки данных серии экспериментов зависит от используемых средств вычислительной техники.

Л и т е р а т у р а

1. **Электротехнический** справочник. В 4-х т. Т. 3. Производство, передача и распределение электрической энергии. М.: Изд-во МЭИ, 2004.
2. **Справочник** по электроснабжению и электрооборудованию промышленных предприятий и общественных зданий / Под общ. ред. С. И. Гамазина, Б. И. Кудрина, С. А. Царука. М.: Изд-во МЭИ, 2010.
3. **Большанин Г. А.** Распределение электрической энергии по участкам электроэнергетических систем. Братск: БрГУ, 2006.
4. **Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А.** Расчёт индуктивностей: Справочная книга. Л.: Энергоатомиздат, 1986.
5. **Иоссель Ю. Я., Кочанов Э. С., Струнский М. Г.** Расчёт электрической ёмкости. Л.: Энергоатомиздат, 1986.
6. **Мельников Н. А., Рокотян С. С., Шеренцис А. Н.** Проектирование электрической части воздушной линии электропередачи 330–500 кВ / Под общ. ред. С. С. Рокотяна. М.: Энергия, 1974.
7. **Кузнецов Ф. Н., Каган В. Г., Малаян Н. Р.** Электрические параметры сталеалюминиевых проводов на промышленной частоте и на высоких частотах // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. 1968. № 3. С. 33–46.
8. **Файбисович В. А.** Определение параметров электрических систем: Новые методы экспериментального определения. М.: Энергия, 1982.
9. **Кротков И. Н.** Точные измерения электрической ёмкости и индуктивности. Схемы, методы, эталоны. М.: Изд-во стандартов, 1966.

Дата принятия 24.03.2015 г.