

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ, РЕАКТОРОВ, СИЛОВЫХ РЕЗИСТОРОВ И КОНДЕНСАТОРНЫХ БАТАРЕЙ ПО МАССИВАМ МГНОВЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ

Д. В. Джумик

Томский политехнический университет
E-mail: dzhumik@tpu.ru

Показана возможность определения параметров статических элементов электроэнергетических систем по массивам мгновенных значений токов и напряжений для различных задач электроэнергетики. Рассмотрены процедуры определения параметров обратной Г-образной схемы замещения линии. Приведены процедуры определения параметров схемы замещения линейного токоограничивающего реактора/резистора и результаты расчета по ним.

Определение параметров схем замещения элементов электроэнергетической системы (ЭЭС) является важной и актуальной задачей для энергетики Российской Федерации. Очевидно, что при управлении контролируемым объектом и диагностировании его технического состояния необходимо иметь достаточно полную и достоверную информацию о параметрах схемы замещения (СЗ). Однако на практике, как правило, параметры схем замещения элементов электроэнергетических систем определяются из справочных или паспортных данных. Известно, что значения параметров СЗ в процессе эксплуатации электрооборудования претерпевают значительные изменения и существенно зависят от множества факторов.

В связи с повсеместным внедрением современным измерительных систем и приборов, использующих цифровые методы обработки и представления информации, аппарат дискретизированной электротехники [1], как нельзя лучше, позволяет сравнительно просто решить ряд задач определения параметров схем замещения объектов электроэнергетики по массивам мгновенных значений (ММЗ). На рис. 1 показана «технология» получения параметров СЗ на «входе» и «выходе» линии электропередачи (ЛЭП). Следует обратить внимание на то, что мгновенные значения сигналов напряжений и токов измеряют в начале и в конце линии и передают массивы с конца линии в ее начало по оптоволоконному, спутниковому или высокочастотному каналу связи (КС) [2].

На рис. 2 приведены основные схемы замещения ЛЭП. Для примера рассматриваем определение параметров обратной Г-образной СЗ ЛЭП.

По массивам отсчетов мгновенных значений тока и напряжения в начале $u_1(t_j)_{j=1}^N, i_1(t_j)_{j=1}^N$ и в конце $u_2(t_j)_{j=1}^N, i_2(t_j)_{j=1}^N$ линии электропередачи, полученным в одни и те же моменты времени $t_j = t_1, t_2, \dots, t_N$ с шагом $\Delta t = T/N$, где T – период сигнала тока (напряжения), а N – число отсчетов на периоде, используя возможности дискретизированной электротехники [1, 3], определяем падение напряжения на продольном сопротивлении схемы замещения и ток в поперечной ветви:

$$\Delta u_{12}(t_j)_{j=1}^N = u_1(t_j)_{j=1}^N - u_2(t_j)_{j=1}^N;$$

$$i_0(t_j)_{j=1}^N = i_1(t_j)_{j=1}^N - i_2(t_j)_{j=1}^N.$$

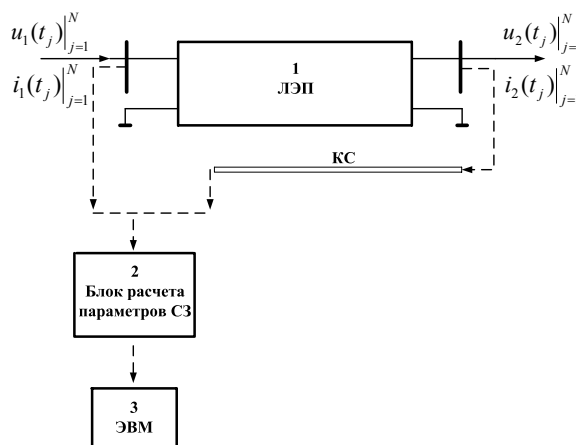


Рис. 1. Получение параметров схемы замещения ЛЭП

Затем по соответствующим процедурам определяем действующие значения токов I_1, I_0 , активные $\Delta P_{12}, \Delta P_0$ и реактивные $\Delta Q_{12}, \Delta Q_0$ потери мощности в продольной и поперечной ветвях:

$$I_1 = \left[\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N i_1^2(t_j)_{j=1}^N \right]^{0.5}; \quad \Delta P_{12} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N [\Delta u_{12}(t_j) \cdot i_1(t_j)]_{j=1}^N;$$

$$\Delta Q_{12} = \frac{1}{4\pi} \sum_{j=1}^N [\Delta u_{12}(t_j) - \Delta u_{12}(t_{j+1})] \cdot [i_1(t_j) + i_1(t_{j+1})]_{j=1}^N;$$

$$I_0 = \left[\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N i_0^2(t_j)_{j=1}^N \right]^{0.5}; \quad \Delta P_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N [u_2(t_j) \cdot i_0(t_j)]_{j=1}^N;$$

$$\Delta Q_0 = \frac{1}{4\pi} \sum_{j=1}^N [u_2(t_j) - u_2(t_{j+1})] \cdot [i_0(t_j) + i_0(t_{j+1})]_{j=1}^N.$$

По мощностям и действующим значениям токов могут быть найдены параметры ветвей СЗ:

$$R_1 = \frac{\Delta P_{12}}{I_1^2}; \quad X_1 = \frac{\Delta Q_{12}}{I_1^2}; \quad R_0 = \frac{\Delta P_0}{I_0^2}; \quad X_0 = \frac{\Delta Q_0}{I_0^2}.$$

Используя аналогичные процедуры можно определить параметры прямой Г-, Т- и П-образной схем замещения линии электропередачи [4–7].

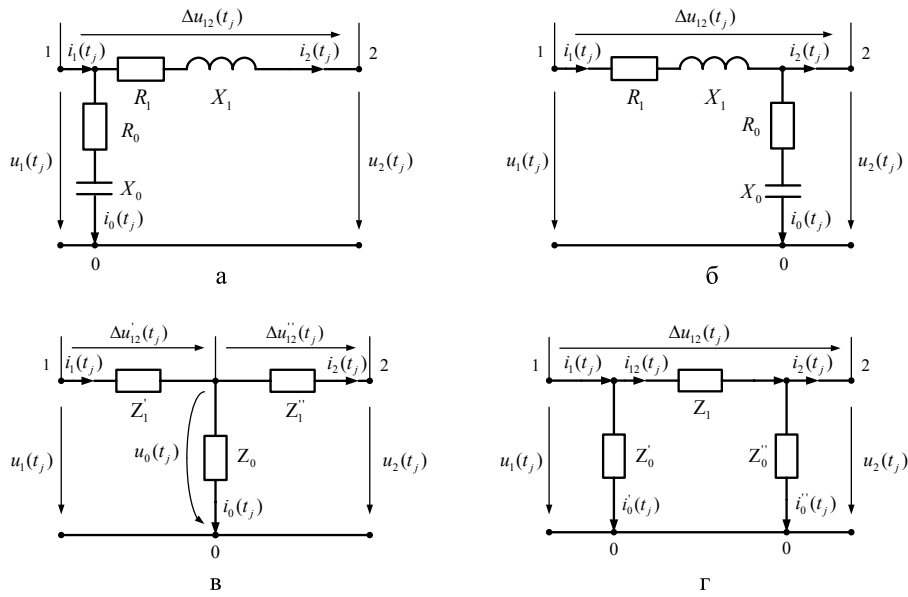


Рис. 2. Схемы замещения линии электропередачи: а) прямая Г-образная; б) обратная Г-образная; в) Т-образная; г) П-образная

Далее рассмотрим способы определения параметров элементов ЭЭС на примере линейного токоограничивающего реактора/резистора.

Первый способ определения параметров линейного токоограничивающего реактора/резистора (см. рис. 3).

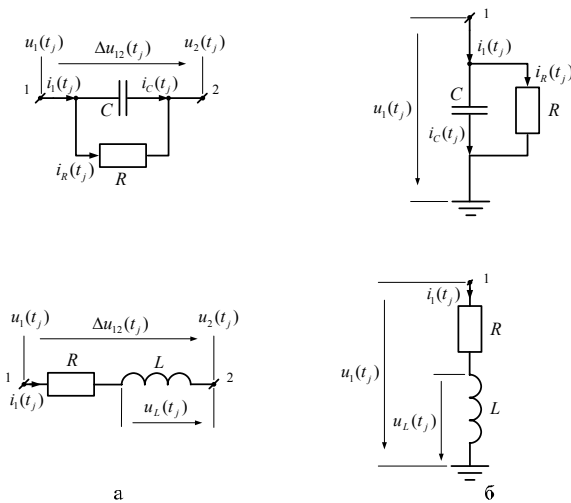


Рис. 3. Схема замещения конденсаторной батареи и реактора/резистора при включении: а) продольном; б) поперечном

По массивам отсчетов мгновенных значений тока и напряжения $u_1(t_j)_{j=1}^N, i_1(t_j)_{j=1}^N, u_2(t_j)_{j=1}^N$ реактора/резистора, полученным в одни и те же моменты времени $t_j = t_1, t_2, \dots, t_N$, с шагом $\Delta t = T/N$, определяем падение напряжения на сопротивлениях схемы замещения:

$$\Delta u_{12}(t_j)_{j=1}^N = u_1(t_j)_{j=1}^N - u_2(t_j)_{j=1}^N.$$

Затем по соответствующим процедурам определяем действующее значение тока, активные и реактивные потери мощности:

$$I_1 = \left[\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N i_1^2(t_j) \right]_{j=1}^N, \Delta P_1 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N [\Delta u_{12}(t_j) \cdot i_1(t_j)]_{j=1}^N,$$

$$\Delta Q_1 = \frac{1}{4\pi} \sum_{j=1}^N [\Delta u_{12}(t_j) - \Delta u_{12}(t_{j+1})] \cdot [i_1(t_j) + i_1(t_{j+1})]_{j=1}^N.$$

Далее находим активное и реактивное сопротивление линейного токоограничивающего реактора/резистора:

$$R = \frac{\Delta P_1}{I_1^2}, \quad X = \frac{\Delta Q_1}{I_1^2}.$$

Рассмотрим **второй способ** определения параметров линейного токоограничивающего реактора/резистора. По массивам отсчетов мгновенных значений тока и напряжения определяем падение напряжения на сопротивлениях схемы замещения, которое включает падения напряжения на активном сопротивлении и индуктивности линейного токоограничивающего реактора/резистора:

$$U_R(t_j) = R \cdot i_1(t_j); \quad U_L(t_j) = L \cdot i_1'(t_j).$$

Следует отметить то, что невозможно «напрямую» определить эти составляющие падения напряжения. Кроме того, при решении данной задачи возникла проблема определения производной тока. Сравнительный анализ пятиточечной и трехточечной формул дифференцирования после сглаживания [8] показал несомненные преимущества первой из формул. Именно она была использована в процедурах определения напряжения на индуктивности и расчетной производной $i_1'(t_j)$:

$$U_L(t_j) = \Delta U_{12}(t_{j+1}) - \frac{\Delta U_{12} \cdot i_1(t_{j+1})}{i_1(t_j)};$$

$$i_1'(t_{j+1}) = \frac{1}{12 \cdot \Delta t} [(i_1(t_{j-1}) - i_1(t_{j+3})) - 8 \cdot (i_1(t_j) - i_1(t_{j+2}))];$$

$$i_1'(t_j) = \frac{1}{12 \cdot \Delta t} [(i_1(t_{j-2}) - i_1(t_{j+2})) - 8 \cdot (i_1(t_{j-1}) - i_1(t_{j+1}))];$$

$$i_p'(t_j) = i_1'(t_{j+1}) - \frac{i_1'(t_j) \cdot i_1(t_{j+1})}{i_1(t_j)}.$$

Затем находим индуктивность и активное сопротивление реактора/резистора:

$$L_i = \frac{U_L(t_j)}{i_p'(t_j)}; \quad R_i = \frac{\Delta U_{12}(t_j) - L_i \cdot i_1'(t_j)}{i_1(t_j)}.$$

В таблице в качестве примера представлены результаты расчетов значений параметров токоограничивающего реактора РБ-10-400-0,35УЗ и силового резистора ШС-300 при $N=64$.

Таблица. Результаты расчетов параметров токоограничивающего реактора РБ-10-400-0,35УЗ и резистора ШС-300. В скобках приведены паспортные данные

| Элемент электрической цепи | R, Ом | X, Ом | Относительная погрешность вычисления, % | |
|--|-------------------|---------------------|---|-------|
| | | | R | X |
| Определение параметров по мощностям | | | | |
| Токоограничивающий реактор РБ-10-400-0,35УЗ | 0,01 (0,01) | 0,349439 (0,35) | 0 | 0,160 |
| Резистор ШС-300 | 150,0002 (150) | 0,376391 (0,377) | 0,0001 | 0,162 |
| Определение параметров по дифференциальным (разностным) уравнениям | | | | |
| Токоограничивающий реактор РБ-10-400-0,35УЗ | 0,01 (0,01) | 0,35 (0,35) | 0 | 0 |
| Резистор ШС-300 | 150,0002 (150) | 0,377 (0,377) | 0,0001 | 0 |

Из таблицы видно, что параметры линейного токоограничивающего реактора/резистора, получен-

ные с помощью предлагаемых способов, близки к паспортным значениям. Наиболее точные значения параметров линейного токоограничивающего реактора/резистора при одинаковом числе отсчетов на периоде сигнала тока (напряжения) можно получить, используя второй способ. Однако наиболее информативным является первый способ определения параметров линейного токоограничивающего реактора/резистора, т. к. он позволяет определить дополнительно параметры электрического режима (интегральные характеристики – активную и реактивную потери мощности, действующее значение тока).

Аналогичные процедуры могут быть также использованы при определении параметров схем замещения конденсаторных батарей и линий электропередачи [1, 9].

Выводы

1. Показана работоспособность процедур определения параметров схем замещения линий электропередач, реакторов, резисторов и конденсаторных батарей по массивам мгновенных значений токов и напряжений.
2. На конкретном примере продемонстрирована возможность получения информации для диагностирования объекта электроэнергетики путем сравнения параметров его схемы замещения в рабочем режиме с аналогичными параметрами при заведомо исправном объекте.
3. Внедрение разработанных процедур определения параметров схемы замещения энергообъекта потребует незначительного усложнения программного обеспечения уже установленных в ЭЭС регистраторов электрических сигналов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гольдштейн Е.И., Бацева Н.Л., Джумик Д.В., Усов Ю.П. Диагностирование электротехнических цепей. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 152 с.
2. Мурзин П.В., Суворов А.А. Алгоритмы формирования параметров электрического режима в адаптивной модели ЭЭС // Вестник УГТУ-УПИ. Энергосистема: управление, качество, конкуренция: Сб. докл. II Всерос. научно-техн. конф. – Екатеринбург: ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ», 2004. – № 12 (42). – С. 424–428.
3. Гольдштейн Е.И. Вопросы дискретной электротехники в курсе «Технология решения инженерных задач» // Вестник УГТУ-УПИ. Энергосистема: управление, качество, конкуренция: Сб. докл. II Всерос. научно-техн. конф. – Екатеринбург: ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ», 2004. – № 12 (42). – С. 473–477.
4. Джумик Д.В., Гольдштейн Е.И., Хрушев Ю.В. Использование массивов мгновенных значений токов и напряжений в задачах формирования адаптивных моделей электроэнергетических систем // Вестник УГТУ-УПИ. Проблемы управления электроэнергетикой в условиях конкурентного рынка: Сб. трудов / Отв. ред. П.И. Бартоломей. – Екатеринбург: ГОУ ВПО «УГТУ», 2005. – № 12 (64). – С. 316–321.
5. Джумик Д.В. Определение текущих параметров электрического режима линии электропередачи для построения ее адаптивной модели // Современные техника и технологии: Труды XI Междунар. научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, 29 марта – 2 апреля 2005 г. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – Т. 1. – С. 82–84.
6. Джумик Д.В. Использование аппарата дискретизированной электротехники при определении текущих параметров схем замещения линии электропередачи // Физико-математическое моделирование систем: Матер. II Междунар. семинара. Ч. 2: Моделирование технических систем. Математическое и программное обеспечение систем компьютерного моделирования. – Воронеж: Воронеж. гос. техн. ун-т, 2005. – С. 17–22.
7. Dzhumik D.V. The determination current parameters electric mode to transmission line for building its T-form adaptive model // Modern Techniques and Technologies (MTT'2006): Proc. of the XII Intern. Scientific and Practical Conf. of Students, Post-graduates and Young Scientists. – Tomsk: Tomsk Polytechnic University, 2006. – P. 12–15.
8. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1978. – 832 с.
9. Гольдштейн Е.И., Хрушев Ю.В., Бацева Н.Л., Джумик Д.В., Кац И.М., Панкратов А.В., Радаев Е.В., Сулайманов А.О. Функциональный контроль и диагностирование электроэнергетических систем и их элементов // Системы электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии: Матер. Междунар. научно-техн. семинара. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – С. 98–108.

Поступила 28.11.2006 г.