

5. Bolshanin, G.A., Bolshanina L.Yu. Distribution of electric energy of the lowered quality on a three-phase three-wire main power line. // Vestn. Izhev. gos. tehn. un-ta. 2008. № 3 (39). P. 130-134.
6. Bolshanin G.A. Bolshanina L.Yu. Features of electric energy distribution on a power line: monograph. Bratsk: izd-vo BrGU, 2011. 64 p.
7. Bolshanin G.A. Distribution of electric energy of the lowered quality on a uniform three-phase three-wire section of the high voltage line // Nauchnyj vestnik Novosib. gos. tehn. un-ta. 2009. № 2. P. 135-144.
8. Bolshanin G.A. Bolshanina L.Yu. Maryasova E.G. Features of distribution of electric energy on a three-wire power line // Sovremennye tehnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie. 2009. № 4. P. 197-204.
9. Bolshanin G.A. Bolshanina L.Yu. Features of distribution of electric energy on a three-wire power line // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2010. No. 4 (28). Page 197-204.
10. Bolshanin G.A. Distribution of electric energy of the lowered quality on sections of electrical power systems // Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Estestvennye i inzhenernye nauki. 2006. Vol. 2. P. 129-140.
11. Bolshanin G. A. Features of transportation of electric energy on three-wire power lines // Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Estestvennye i inzhenernye nauki. 2010. Vol. 2. P. 64-68.
12. Bolshanin G.A. Bolshanina L.Yu. Maryasova E.G. Features of distribution of electric energy on multiwire power lines // Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Estestvennye i inzhenernye nauki. 2011. Vol. 2. P. 38-43.
13. Bolshanin G. A. Forecasting way of harmonious components distribution of electric energy in unbranched sections of electrical power system: pat. 2210154 Rus. Federation № 2001106402; decl. 06.03.01; publ. 10.08.03, Bull. № 22. 14 p.
14. Bolshanin G.A. Bolshanina L.Yu. Maryasova E.G. Electric energy transferring on homogeneous section of three-phase three-wire high voltage line, being a part of symmetric electric power system // Vestn. Irkut. gos. tehn. un-ta. 2011. № 10 (57). P. 179-186.
15. Ryzhov Yu.P. Distant electricity transmissions of ultrahigh tension. M.: Izd. dom MEI, 2007. 488 p.

УДК 621.311.004.12

Способ расчета коэффициентов восьмиполюсника, замещающего однородный участок трехпроводной линии электропередачи

Г.А. Большанин^a, Л.Ю. Большанина^b, Е.Г. Марьясова^c

Братский государственный университет, Макаренко 40, Братск, Россия

^abolshaning@mail.ru, ^bbrstu@bk.ru, ^cmarkageo@mail.ru

Статья поступила 28.11.2013, принята 25.01.2014

Представлена схема замещения однородного участка трехпроводной линии электропередачи в виде восьмиполюсника. Фазные напряжения и линейные токи можно определить через коэффициенты этого восьмиполюсника. Восьмиполюсник описывается шестью уравнениями. Коэффициенты восьмиполюсника можно определить, зная вторичные параметры ЛЭП. Здесь предложена методика определения коэффициентов этого восьмиполюсника из серии опытов холостого хода и короткого замыкания. В эксперименте участвуют: источник трехфазной ЭДС, желательного пониженного напряжения; шесть вольтметров; шесть амперметров; шесть фазометров; двенадцать коммутрующих устройств, в качестве которых могут быть использованы обычные выключатели или рубильники.

Ключевые слова: восьмиполюсник, трехфазная трехпроводная линия электропередачи, коэффициенты восьмиполюсника, опыт холостого хода, опыт короткого замыкания.

Calculation method of coefficients of the eight-terminal circuit, substituting a homogeneous section of the three-wire power line

G.A. Bolshanin^a, L.Yu. Bolshanina^b, E.G. Maryasova^c

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

^abolshaning@mail.ru, ^bbrstu@bk.ru, ^cmarkageo@mail.ru

Received 28.11.2013, accepted 25.01.2014

The circuit of substitution of a homogeneous section of the three-wire power line has been shown in the form of the eight-terminal circuit. Phase voltages and linear currents can be defined through coefficients of the eight-terminal circuit. The eight-terminal circuit is presented by six equations. Coefficients of the eight-terminal circuit can be defined, knowing secondary parameters of the high voltage line. The article proposes a method of determination of coefficients of the eight-terminal circuit from the set of open-circuit tests and short-circuit tests. A source of three-phase EMF of lower voltage (desirable), six voltage meters, six amperimeters, six phasemeters and twelve contact elements, such as circuit switches or circuit breakers, have been involved in the experiment.

Keywords: eight-terminal circuit, three-phase three-wire power line, coefficients of the eight-terminal circuit, open-circuit test, short-circuit test.

Введение. Передача электрической энергии от источника к потребителю осуществляется, в основном, линиями электропередачи (ЛЭП) высокого напряжения трехфазного трехпроводного исполнения. Для обеспечения качественного и надежного электроснабжения в процессе эксплуатации ЛЭП необходимо контролировать распределение основных характеристик электрической энергии вдоль действующих линий электропередачи [1 – 5].

Методика исследования. Однородный участок трехпроводной ЛЭП может быть замещен полнофазной схемой замещения [5] или восьмиполюсником, как показано на рис. 1. Участок трехфазной трехпроводной ЛЭП имеет четыре входа (три линейных провода и один провод, иллюстрирующий поверхность Земли) и четыре выхода.

Идея использования многополюсников для замещения электрических устройств не нова [6 – 19]. Восьмиполюсник, замещающий однородный участок трехфазной трехпроводной ЛЭП, может быть описан шестью уравнениями (1).

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{1An} &= A_{an}\dot{U}_{2An} + B_{an}\dot{I}_{2An} + N_{an}\dot{U}_{2Bn} + \\ &+ O_{an}\dot{I}_{2Bn} + P_{an}\dot{U}_{2Cn} + Q_{an}\dot{I}_{2Cn} \\ \dot{U}_{1Bn} &= A_{bn}\dot{U}_{2Bn} + B_{bn}\dot{I}_{2Bn} + N_{bn}\dot{U}_{2An} + \\ &+ O_{bn}\dot{I}_{2An} + P_{bn}\dot{U}_{2Cn} + Q_{bn}\dot{I}_{2Cn} \\ \dot{U}_{1Cn} &= A_{cn}\dot{U}_{2Cn} + B_{cn}\dot{I}_{2Cn} + N_{cn}\dot{U}_{2An} + \\ &+ O_{cn}\dot{I}_{2An} + P_{cn}\dot{U}_{2Bn} + Q_{cn}\dot{I}_{2Bn} \\ \dot{I}_{1An} &= C_{an}\dot{U}_{2An} + D_{an}\dot{I}_{2An} + E_{an}\dot{U}_{2Bn} + \\ &+ F_{an}\dot{I}_{2Bn} + G_{an}\dot{U}_{2Cn} + H_{an}\dot{I}_{2Cn} \\ \dot{I}_{1Bn} &= C_{bn}\dot{U}_{2Bn} + D_{bn}\dot{I}_{2Bn} + E_{bn}\dot{U}_{2An} + \\ &+ F_{bn}\dot{I}_{2An} + G_{bn}\dot{U}_{2Cn} + H_{bn}\dot{I}_{2Cn} \\ \dot{I}_{1Cn} &= C_{cn}\dot{U}_{2Cn} + D_{cn}\dot{I}_{2Cn} + E_{cn}\dot{U}_{2An} + \\ &+ F_{cn}\dot{I}_{2An} + G_{cn}\dot{U}_{2Bn} + H_{cn}\dot{I}_{2Bn} \end{aligned} \right\} (1)$$

где $A_a, B_a, C_a, D_a, E_a, F_a, G_a, H_a, N_a, O_a, P_a, Q_a, A_b, B_b, C_b, D_b, E_b, F_b, G_b, H_b, N_b, O_b, P_b, Q_b, A_c, B_c, C_c, D_c, E_c, F_c, G_c, H_c, N_c, O_c, P_c$ и Q_c – пофазные коэффициенты восьмиполюсника.

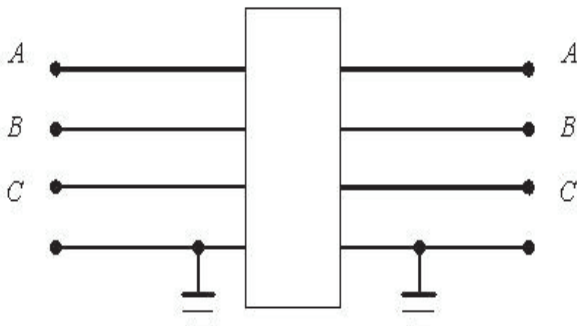


Рис. 1. Восьмиполюсник, замещающий однородный участок трехфазной трехпроводной ЛЭП

В этих уравнениях участвуют коэффициенты восьмиполюсника, которые могут быть определены при известных вторичных параметрах ЛЭП из равенств [6]:

$$A_a = A_b = A_c = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 ch\gamma_{in}y; \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} B_a &= \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \underline{Z}_{cAin} sh\gamma_{in}y; \\ B_b &= \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \underline{Z}_{cBin} sh\gamma_{in}y; \\ B_c &= \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \underline{Z}_{cCin} sh\gamma_{in}y; \end{aligned} \right\} (3)$$

$$\left. \begin{aligned} C_a &= \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \frac{sh\gamma_{in}y}{\underline{Z}_{cAin}}; \\ C_b &= \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \frac{sh\gamma_{in}y}{\underline{Z}_{cBin}}; \\ C_c &= \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \frac{sh\gamma_{in}y}{\underline{Z}_{cCin}}; \end{aligned} \right\} (4)$$

$$D_a = D_b = D_c = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 ch\gamma_{in}y; \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} E_a &= \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \frac{sh\gamma_{in}y}{\underline{Z}_{cABin}}; \\ E_b &= \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \frac{sh\gamma_{in}y}{\underline{Z}_{cABin}}; \\ E_c &= \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \frac{sh\gamma_{in}y}{\underline{Z}_{cCAin}}; \end{aligned} \right\} (6)$$

$$\left. \begin{aligned} F_a &= \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \frac{\underline{Z}_{cBin}}{\underline{Z}_{cABin}} ch\gamma_{in}y; \\ F_b &= \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \frac{\underline{Z}_{cAin}}{\underline{Z}_{cABin}} ch\gamma_{in}y; \\ F_c &= \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \frac{\underline{Z}_{cAin}}{\underline{Z}_{cCAin}} ch\gamma_{in}y; \end{aligned} \right\} (7)$$

$$\left. \begin{aligned} G_a &= \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \frac{sh\gamma_{in}y}{\underline{Z}_{cCAin}}; \\ G_b &= \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \frac{sh\gamma_{in}y}{\underline{Z}_{cBCin}}; \\ G_c &= \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \frac{sh\gamma_{in}y}{\underline{Z}_{cBCin}}; \end{aligned} \right\} (8)$$

$$\left. \begin{aligned} H_a &= \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \frac{Z_{cCin}}{Z_{cCAin}} ch\gamma_{in} y ; \\ H_b &= \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \frac{Z_{cCin}}{Z_{cBCin}} ch\gamma_{in} y ; \\ H_c &= \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \frac{Z_{cBin}}{Z_{cBCin}} ch\gamma_{in} y ; \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} N_a &= N_b = N_c = 0 ; \\ O_a &= O_b = O_c = 0 ; \\ P_a &= P_b = P_c = 0 ; \\ Q_a &= Q_b = Q_c = 0 . \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Судя по приведенным выше равенствам, для анализируемого восьмиполюсника соблюдаются условия симметричности:

$$\left. \begin{aligned} A_a &= D_a ; \\ A_b &= D_b ; \\ A_c &= D_c . \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Восьмиполюсник является симметричным, то есть, электрическая энергия может быть подана либо с начала анализируемого участка ЛЭП, либо с его конца. Параметры электрической энергии при этом не изменятся. Кроме того, для этого восьмиполюсника оказываются справедливыми равенства:

$$\left. \begin{aligned} A_a D_a - B_a C_a &= 1 ; \\ A_b D_b - B_b C_b &= 1 ; \\ A_c D_c - B_c C_c &= 1 . \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Так восьмиполюсником можно заместить однофазный участок трехфазной ЛЭП трехпроводного исполнения.

Каждая линия трехпроводного участка ЛЭП характеризуется двенадцатью коэффициентами восьмиполюсника. Всего тридцать шесть коэффициентов. Анализируемый восьмиполюсник характеризуют тридцать шесть коэффициентов. Двух упомянутых условий, (11) и (12), для определения численных значений этих коэффициентов недостаточно. Необходимо выполнить несколько экспериментов: опытов холостого хода и короткого замыкания. Серия опытов выполняется по схеме, изображенной на рис. 2. В этой схеме участвуют: источник трехфазной ЭДС или три источника однофазных, равных по величине ЭДС, начальные фазы которых могут быть сдвинуты относительно друг друга на треть периода, желательного пониженного напряжения; шесть вольтметров; шесть амперметров; шесть фазометров; двенадцать коммутирующих устройств, в качестве которых могут быть использованы обычные выключатели или рубильники.

Первый опыт может быть опытом холостого хода. Этот опыт предполагает отключение от исследуемой линии электропередачи электрической нагрузки Н. Для этого необходимо разомкнуть ключи S4, S5 и S6. Кроме того, должны быть разомкнуты ключи S7, S8, S9, S10, S11 и S12. Ключи S1, S2 и S3 должны быть замкнуты.

В качестве источника энергии в этом опыте могут быть использованы как автономный источник трехфазной ЭДС пониженного напряжения, так и действующая электроэнергетическая система. Нужно только подобрать соответствующие электроизмерительные приборы.

В этом случае вольтметры PV1, PV2 и PV3 покажут величины действующих фазных напряжений на входе восьмиполюсника, соответственно U_{1A1} , U_{1B1} и U_{1C1} . Амперметры PA1, PA2 и PA3 покажут величины линейных токов на входе восьмиполюсника, соответственно I_{1A1} , I_{1B1} и I_{1C1} . Фазометры Pφ1, Pφ2 и Pφ3 покажут углы сдвига фаз между соответствующими фазными напряжениями и линейными токами на входе анализируемого восьмиполюсника. Зная углы сдвига фаз между фазными ЭДС, величины которых определяются показаниями вольтметров PV1, PV2 и PV3, входные напряжения и токи можно представить в виде изображений на комплексной плоскости \dot{U}_{1A1} , \dot{U}_{1B1} , \dot{U}_{1C1} и \dot{I}_{1A1} , \dot{I}_{1B1} , \dot{I}_{1C1} .

Токи на выходе анализируемого восьмиполюсника будут отсутствовать:

$$\dot{I}_{2A1} = \dot{I}_{2B1} = \dot{I}_{2C1} = 0 . \quad (13)$$

Этот факт подтверждается нулевыми значениями амперметров PA4, PA5 и PA6. Но показания вольтметров PV4, PV5 и PV6 отличны от нуля. Они покажут действующие значения фазных напряжений U_{2A1} , U_{2B1} и U_{2C1} на выходе восьмиполюсника.

Показания фазометров Pφ4, Pφ5 и Pφ6 в этом опыте отсутствуют.

Начальные фазы выходных фазных напряжений можно определить либо в результате прямых измерений специализированными приборами, либо в результате косвенных измерений, совмещенных с соответствующими расчетами. Исходными данными для таких расчетов могут быть, например, углы сдвига фаз между соответствующими выходными фазными напряжениями и входными линейными токами, которые могут зарегистрировать фазометры Pφ1, Pφ2 и Pφ3 при переключении входов на их измерительных обмотках напряжений с входных (рис. 2) на выходные клеммы восьмиполюсника. Такая операция позволит определить изображения выходных фазных напряжений на комплексной плоскости: \dot{U}_{2A1} , \dot{U}_{2B1} и \dot{U}_{2C1} .

С учетом равенств (10) и (13) уравнения восьмиполюсника (1) переписутся так:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{1A1} &= A_a \dot{U}_{2A1} ; \\ \dot{U}_{1B1} &= A_b \dot{U}_{2B1} ; \\ \dot{U}_{1C1} &= A_c \dot{U}_{2C1} ; \\ \dot{I}_{1A1} &= C_a \dot{U}_{2A1} + E_a \dot{U}_{2B1} + G_a \dot{U}_{2C1} ; \\ \dot{I}_{1B1} &= C_b \dot{U}_{2B1} + E_b \dot{U}_{2A1} + G_b \dot{U}_{2C1} ; \\ \dot{I}_{1C1} &= C_c \dot{U}_{2C1} + E_c \dot{U}_{2A1} + G_c \dot{U}_{2B1} . \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

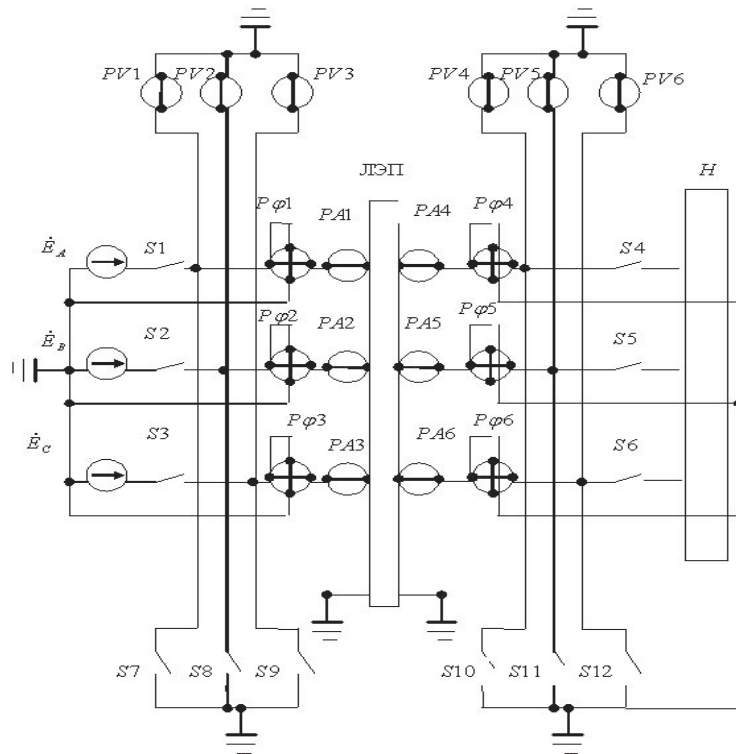


Рис. 2. Схема серии экспериментов для определения коэффициентов восьмиполусника, замещающего однородный участок трехпроводной ЛЭП

Из этих уравнений можно получить численные значения коэффициентов A_a , A_b и A_c :

$$\left. \begin{aligned} A_a &= \frac{\dot{U}_{1A1}}{\dot{U}_{2A1}}; \\ A_b &= \frac{\dot{U}_{1B1}}{\dot{U}_{2B1}}; \\ A_c &= \frac{\dot{U}_{1C1}}{\dot{U}_{2C1}}. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Из условий (12) следует, что по этим же уравнениям определяются и коэффициенты D_a , D_b и D_c :

$$\left. \begin{aligned} D_a &= \frac{\dot{U}_{1A1}}{\dot{U}_{2A1}}; \\ D_b &= \frac{\dot{U}_{1B1}}{\dot{U}_{2B1}}; \\ D_c &= \frac{\dot{U}_{1C1}}{\dot{U}_{2C1}}. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Для определения остальных коэффициентов восьмиполусника следует выполнить еще ряд экспериментов.

Вторым опытом может быть опыт короткого замыкания. Для этого опыта необходимы автономный источник трехфазной ЭДС пониженного напряжения ($\leq 4 \div 5\%$ от $U_{ном}$) и чувствительные электроизмерительные приборы.

Описываемый опыт выполняется замыканием ключей S10, S11 и S12. Кроме того, должны быть замкнуты

ключи S1, S2 и S3. Ключи S4, S5, S6, S7, S8 и S9 должны быть разомкнуты.

Электроизмерительные приборы PV1, PV2, PV3, PA1, PA2, PA3, Pφ1, Pφ2 и Pφ3 в этом опыте будут регистрировать входные для анализируемого восьмиполусника характеристики электрической энергии. На основании показаний этих приборов формируются изображения входных фазных напряжений \dot{U}_{1A2} , \dot{U}_{1B2} , \dot{U}_{1C2} и линейных токов \dot{I}_{1A2} , \dot{I}_{1B2} , \dot{I}_{1C2} .

Вольтметры PV4, PV5 и PV6 в этом опыте будут иметь нулевые значения, что свидетельствует об отсутствии выходных фазных напряжений:

$$\dot{U}_{2A2} = \dot{U}_{2B2} = \dot{U}_{2C2} = 0. \quad (17)$$

Но показания амперметров PA4, PA5 и PA6 будут отличны от нуля. Они позволят зарегистрировать действующие значения выходных линейных токов I_{2A2} , I_{2B2} и I_{2C2} .

Если начала измерительных обмоток напряжения фазометров Pφ4, Pφ5 и Pφ6 переключить с выходных клемм восьмиполусника (рис. 2) на входные, то эти фазометры регистрируют углы сдвига фаз между соответствующими входными фазными напряжениями и выходными линейными токами. Эта операция позволит определить начальные фазы выходных линейных токов и, в конечном счете, их изображения на комплексной плоскости: \dot{I}_{2A2} , \dot{I}_{2B2} и \dot{I}_{2C2} .

С учетом равенств (10) и (17) работа восьмиполусника в режиме полнофазного короткого замыкания описывается уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{1A2} &= B_a \dot{I}_{2A2}; \\ \dot{U}_{1B2} &= B_b \dot{I}_{2B2}; \\ \dot{U}_{1C2} &= B_c \dot{I}_{2C2}; \\ \dot{I}_{1A2} &= D_a \dot{I}_{2A2} + F_a \dot{I}_{2B2} + H_a \dot{I}_{2C2}; \\ \dot{I}_{1B2} &= D_b \dot{I}_{2B2} + F_b \dot{I}_{2A2} + H_b \dot{I}_{2C2}; \\ \dot{I}_{1C2} &= D_c \dot{I}_{2C2} + F_c \dot{I}_{2A2} + H_c \dot{I}_{2B2}. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Из этих уравнений определяются коэффициенты B_a , B_b и B_c :

$$\left. \begin{aligned} B_a &= \frac{\dot{U}_{1A2}}{\dot{I}_{2A2}}; \\ B_b &= \frac{\dot{U}_{1B2}}{\dot{I}_{2B2}}; \\ B_c &= \frac{\dot{U}_{1C2}}{\dot{I}_{2C2}}. \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

Коэффициенты восьмиполюсника C_a , C_b и C_c определяются из условий (12):

$$\left. \begin{aligned} C_a &= \frac{A_a D_a - 1}{B_a}; \\ C_b &= \frac{A_b D_b - 1}{B_b}; \\ C_c &= \frac{A_c D_c - 1}{B_c}. \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

Для определения коэффициентов E_a , E_b , E_c и G_a , G_b , G_c необходимо выполнить еще один эксперимент – неполнофазный опыт холостого хода. Этот опыт тоже выполняется по схеме, изображенной на рис. 2.

Третий опыт. опыт неполнофазного холостого хода, выполняется при размыкании ключей S4, S5 и S6. Кроме того, должны быть разомкнуты ключи S2, S3, S7, S8, S9, S10, S11 и S12. Замкнут должен быть лишь ключ S1. Таким образом, к входу восьмиполюсника, замещающего однородный участок трехпроводной ЛЭП, оказывается подключенной лишь однофазная ЭДС \dot{E}_A . Энергия от других фаз трехфазного источника электрической энергии на вход восьмиполюсника не поступает. Это значит, что амперметры PA2 и PA3, а также фазометры Рф2 и Рф3, будут иметь нулевые значения. А вольтметр PV1, амперметр PA1 и фазометр Рф1 будут иметь значения, отличные от нуля. Из-за наличия электромагнитных связей между токоведущими частями исследуемого однородного участка трехпроводной ЛЭП показания вольтметров PV2 и HV3 тоже будут отличны от нуля. Эти приборы должны обладать соответствующей чувствительностью. Показания перечисленных электроизмерительных приборов позволяют сформулировать комплексные значения входных характеристик восьмиполюсника: \dot{U}_{1A3} , \dot{U}_{1B3} , \dot{U}_{1C3} и \dot{I}_{1A3} .

Показания амперметров PA4, PA5, PA6 и фазометров Рф4, Рф5 и Рф6, подключенных к выходным клеммам анализируемого восьмиполюсника, как показано на рис. 2, имеют нулевые значения. То есть, в этом случае справедливо равенство:

$$\dot{I}_{2A3} = \dot{I}_{2B3} = \dot{I}_{2C3} = 0. \quad (21)$$

Вольтметры PV4, PV5 и PV при исполнении этого опыта регистрируют выходные фазные напряжения U_{2A3} , U_{2B3} и U_{2C3} . Переключение начала измерительных обмоток напряжения фазометров Рф1, Рф2 и Рф3 с входных клемм восьмиполюсника на выходные позволит зарегистрировать этими приборами углы сдвига фаз между соответствующими выходными фазными напряжениями и входными линейными токами, что позволит определить начальные фазы выходных фазных напряжений и, в конечном счете, изображения этих напряжений на комплексной плоскости \dot{U}_{2A3} , \dot{U}_{2B3} и \dot{U}_{2C3} .

С учетом равенств (10) и (21), работа восьмиполюсника в неполнофазном режиме холостого хода описывается уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{1A3} &= A_a \dot{U}_{2A3}; \\ \dot{U}_{1B3} &= A_b \dot{U}_{2B3}; \\ \dot{U}_{1C3} &= A_c \dot{U}_{2C3}; \\ \dot{I}_{1A3} &= C_a \dot{U}_{2A3} + E_a \dot{U}_{2B3} + G_a \dot{U}_{2C3}; \\ 0 &= C_b \dot{U}_{2B3} + E_b \dot{U}_{2A3} + G_b \dot{U}_{2C3}; \\ 0 &= C_c \dot{U}_{2C3} + E_c \dot{U}_{2A3} + G_c \dot{U}_{2B3}. \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

В этих уравнениях известны численные значения коэффициентов A_a , A_b , A_c (15) и C_a , C_b , C_c (20). Численные значения коэффициентов E_a , E_b , E_c и G_a , G_b , G_c следует определить.

Численные значения коэффициентов E_a и G_a могут быть определены из результатов совместного решения четвертого уравнения системы уравнений (14) и четвертого уравнения системы уравнений (22):

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{1A1} &= C_a \dot{U}_{2A1} + E_a \dot{U}_{2B1} + G_a \dot{U}_{2C1}; \\ \dot{I}_{1A3} &= C_a \dot{U}_{2A3} + E_a \dot{U}_{2B3} + G_a \dot{U}_{2C3}. \end{aligned} \right\}$$

Из этих уравнений получается, что:

$$E_a = \frac{C_a \dot{U}_{2A1} \dot{U}_{2C3} + \dot{U}_{2C1} \dot{I}_{1A3} - C_a \dot{U}_{2C1} \dot{U}_{2A3} - \dot{U}_{2C3} \dot{I}_{1A1}}{\dot{U}_{2C1} \dot{U}_{2B3} + \dot{U}_{2B1} \dot{U}_{2C3}}; \quad (23)$$

$$G_a = \frac{\dot{I}_{1A3} - C_a \dot{U}_{2A3} - E_a \dot{U}_{2B3}}{\dot{U}_{2C3}}. \quad (24)$$

Из уравнений (6) следует, что:

$$E_b = E_a. \quad (25)$$

Тогда из решения пятого уравнения системы уравнений (22) получается, что:

$$G_b = -\frac{C_b \dot{U}_{2B3} + E_b \dot{U}_{2A3}}{\dot{U}_{2C3}}. \quad (26)$$

Уравнения (8) подтверждают равенство:

$$G_c = G_b. \quad (27)$$

Из последнего уравнения системы уравнений (22) следует, что:

$$E_c = -\frac{C_c \dot{U}_{2C3} + G_c \dot{U}_{2B3}}{\dot{U}_{2A3}}. \quad (28)$$

Или проще:

$$E_c = G_a. \quad (29)$$

Для получения численных значений коэффициентов восьмиполюсника F_a, F_b, F_c и H_a, H_b, H_c следует выполнить еще один опыт. Целесообразно, чтобы это был опыт короткого замыкания при неполнофазном питании восьмиполюсника.

Это будет четвертый опыт, выполняемый по схеме, указанной на рис. 2.

В этом случае, как и в предыдущем, предлагается подключить лишь одну однофазную ЭДС. Пусть это будет \dot{E}_A . Для этого необходимо разомкнуть ключи S2 и S3 и замкнуть ключ S1. Кроме того, необходимо замкнуть ключи S10, S11 и S12, а также разомкнуть ключи S4, S5, S6, S7, S8 и S9.

В результате этих действий на входе анализируемого восьмиполюсника будут отсутствовать линейные токи \dot{I}_{1B4} и \dot{I}_{1C4} :

$$\dot{I}_{1B4} = \dot{I}_{1C4} = 0. \quad (30)$$

Об этом будут свидетельствовать нулевые показания амперметров PA2 и PA3. А показания амперметра PA1 будут отличны от нуля: он покажет действующее значение линейного тока I_{1A4} . Вольтметры PV1, PV2 и PV3 позволят зарегистрировать входные фазные напряжения U_{1A4}, U_{1B4} и U_{1C4} . Фазометр Pф1 покажет угол сдвига фаз между входным напряжением U_{1A4} и входным линейным током I_{1A4} . Показания этих приборов позволят определить изображения входных характеристик электрической энергии на комплексной плоскости $\dot{U}_{1A4}, \dot{U}_{1B4}, \dot{U}_{1C4}$ и \dot{I}_{1A4} .

Выходные значения фазных напряжений в этом опыте будут отсутствовать:

$$\dot{U}_{2A4} = \dot{U}_{2B4} = \dot{U}_{2C4} = 0. \quad (31)$$

Об этом свидетельствуют нулевые показания вольтметров PV4, PV5 и PV6. А амперметры PA4, PA5 и PA6 покажут действующие значения выходных линейных токов I_{2A4}, I_{2B4} и I_{2C4} .

Если начала измерительных обмоток напряжения фазометров Pф4, Pф5 и Pф6 переключить с выходных клемм анализируемого восьмиполюсника на его входные клеммы, то эти приборы смогут зарегистрировать углы сдвига

фаз между соответствующими входными фазными напряжениями и выходными линейными токами.

В результате надлежащей обработки показаний электроизмерительных приборов можно получить изображения выходных линейных токов на комплексной плоскости $\dot{I}_{2A4}, \dot{I}_{2B4}$ и \dot{I}_{2C4} .

С учетом равенств (10), (30) и (31) работа восьмиполюсника в неполнофазном режиме короткого замыкания описывается уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{1A4} &= B_a \dot{I}_{2A4}; \\ \dot{U}_{1B4} &= B_b \dot{I}_{2B4}; \\ \dot{U}_{1C4} &= B_c \dot{I}_{2C4}; \\ \dot{I}_{1A4} &= D_a \dot{I}_{2A4} + F_a \dot{I}_{2B4} + H_a \dot{I}_{2C4}; \\ 0 &= D_b \dot{I}_{2B4} + F_b \dot{I}_{2A4} + H_b \dot{I}_{2C4}; \\ 0 &= D_c \dot{I}_{2C4} + F_c \dot{I}_{2A4} + H_c \dot{I}_{2B4}. \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

В этих уравнениях известны численные значения коэффициентов B_a, B_b, B_c (19) и D_a, D_b, D_c (16). Требуется определить численные значения коэффициентов F_a, F_b, F_c и H_a, H_b, H_c .

Численные значения коэффициентов F_a и H_a можно определить в результате совместного решения четвертого уравнения системы уравнений (18) и четвертого уравнения системы уравнений (32):

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{1A2} &= D_a \dot{I}_{2A2} + F_a \dot{I}_{2B2} + H_a \dot{I}_{2C2}; \\ \dot{I}_{1A4} &= D_a \dot{I}_{2A4} + F_a \dot{I}_{2B4} + H_a \dot{I}_{2C4}. \end{aligned} \right\}$$

В результате совместного решения этих уравнений получается, что:

$$F_a = \frac{D_a \dot{I}_{2A2} \dot{I}_{2C4} + \dot{I}_{2C2} \dot{I}_{1A4} - D_a \dot{I}_{2C2} \dot{I}_{2A4} - \dot{I}_{1A2} \dot{I}_{2C4}}{\dot{I}_{2C2} \dot{I}_{2B4} + \dot{I}_{2B2} \dot{I}_{2C4}};$$

$$H_a = \frac{\dot{I}_{1A4} - D_a \dot{I}_{2A4} - F_a \dot{I}_{2B4}}{\dot{I}_{2C4}}.$$

Из совместного решения пятого уравнения системы уравнений (18) и пятого уравнения системы уравнений (32) можно определить коэффициенты F_b и H_b .

Полученная таким образом система уравнений имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{1B2} &= D_b \dot{I}_{2B2} + F_b \dot{I}_{2A2} + H_b \dot{I}_{2C2}; \\ 0 &= D_b \dot{I}_{2B4} + F_b \dot{I}_{2A4} + H_b \dot{I}_{2C4}. \end{aligned} \right\}$$

Результат совместного решения этих уравнений может быть представлен так:

$$F_b = \frac{D_b \dot{I}_{2B2} \dot{I}_{2C4} - D_b \dot{I}_{2C2} \dot{I}_{2B4} - \dot{I}_{1B2} \dot{I}_{2C4}}{\dot{I}_{2C2} \dot{I}_{2A4} - \dot{I}_{2A2} \dot{I}_{2C4}};$$

$$H_b = -\frac{D_b \dot{I}_{2B4} + F_b \dot{I}_{2A4}}{\dot{I}_{2C4}}.$$

Для определения коэффициентов F_c и H_c необходимо совместное решение последнего уравнения сис

темы уравнений (18) и последнего уравнения системы уравнений (32).

Вновь полученная таким образом система уравнений имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{1C2} &= D_c \dot{I}_{2C2} + F_c \dot{I}_{2A2} + H_c \dot{I}_{2B2} \\ 0 &= D_c \dot{I}_{2C4} + F_c \dot{I}_{2A4} + H_c \dot{I}_{2B4} \end{aligned} \right\}$$

Результат совместного решения этих уравнений можно представить в виде:

$$F_c = \frac{D_c \dot{I}_{2C2} \dot{I}_{2B4} - D_c \dot{I}_{2B2} \dot{I}_{2C4} - \dot{I}_{1C2} \dot{I}_{2B4}}{\dot{I}_{2B2} \dot{I}_{2A4} - \dot{I}_{2A2} \dot{I}_{2B4}};$$

$$H_c = -\frac{D_c \dot{I}_{2C4} + F_c \dot{I}_{2A4}}{\dot{I}_{2B4}}.$$

Таким образом, для определения численных значений всех коэффициентов восьмиполосника, замещающего однородный участок трехфазной ЛЭП трехпроводного исполнения, была выполнена серия экспериментов из четырех опытов: опыта полнофазного холостого хода, опыта полнофазного короткого замыкания и двух подобных опытов холостого хода и короткого замыкания при неполнофазном питании исследуемого восьмиполосника.

Использованные в этой схеме переключатели дают возможность выполнения и иного набора опытов. Конечно, формулы для определения численных значений коэффициентов восьмиполосника в таком случае будут иметь другой вид. Но методика построения этих формул будет аналогична используемому здесь способу. Так восьмиполосником можно заместить однородный участок трехфазной ЛЭП трехпроводного исполнения.

Но реальная ЛЭП не может быть абсолютно однородной. Речь может идти лишь об относительной однородности. Границами однородности могут служить узлы, изменение сечения и химического состава проводов, изменение рельефа местности и т. п. Действующую ЛЭП целесообразно представлять в виде цепной схемы, состоящей из нескольких многополосников (рис. 3) [6, 8 – 10].

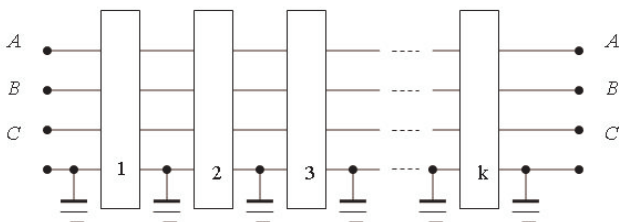


Рис. 3. Схема замещения неоднородного участка трехфазной трехпроводной ЛЭП восьмиполосником

Анализу ЛЭП, отличающейся явно выраженной неоднородностью, следуя рекомендациям, изложенным в [6, 8 – 11], предшествует деление линии электропередачи по всей ее протяженности на относительно однородные участки, как показано на рис. 3.

Действующие ЛЭП, как правило, снабжены разнообразной линейной арматурой. Чаще всего это дугогасящие и компенсирующие реакторы, конденсаторные установки для продольной и поперечной компенсации

реактивной мощности, фильтрокомпенсирующие устройства и прочее оборудование, обеспечивающее должную пропускную способность ЛЭП. Каждое из этих устройств должно быть учтено при анализе распределения электрической энергии вдоль рассматриваемой ЛЭП. Это значит, что каждое из этих устройств, или каждую группу этих устройств, также надлежит представить в виде восьмиполосника.

Выводы

1. Теория многополосников в сочетании с экспериментальными исследованиями применима в силовой энергетике.

2. Существует реальная возможность представления в виде многополосников однородных участков ЛЭП с большим числом проводов в виде многополосников.

Литература

1. Большанин Г.А., Тен Р.В., Плотноков М.П. Согласование нагрузки с электрической сетью как повышение качества электрической энергии // Труды Братского государственного университета. Сер. Естественные и инженерные науки. 2008. № 2. С. 92-95.
2. Большанин Г.А. Особенности транспортировки электрической энергии по трехпроводным линиям электропередачи // Там же. 2010. Т. 2. С. 64-68.
3. Козлов В.А., Большанин Г.А. Согласованный режим работы однородной трехпроводной высоковольтной линии как средство повышения надежности работы гидроэлектростанции // Братская ГЭС: история строительства, опыт эксплуатации, перспективы: Тр. Всерос. науч.-практ. конф. Братск, 2011. С.77-81.
4. Большанин Г.А., Большанина Л.Ю., Марьясова Е.Г. Линия электропередачи как объект системного анализа // Materialy VII Miedzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji konferencji «Perspektywiczne opracowania sa nauka i technikami – 2011» Vol. 55. Techniczne nauki.: Przemysl. Nauka I studia. P. 103-105.
5. Большанин Г.А., Большанина Л.Ю. Особенности распространения электрической энергии по трехпроводной линии электропередачи // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2010. № 4 (28). С. 197-204.
6. Большанин Г.А. Распределение электрической энергии по участкам электроэнергетических систем. Братск: БрГУ, 2006. Кн. 2. 807 с.
7. Большанин Г.А., Большанина Л.Ю. Параметры трехпроводной ЛЭП. Метод восьмиполосника. Братск: Изд-во БрГУ, 2012. 259 с.
8. Большанин Г.А., Большанина Л.Ю. Распределение электрической энергии пониженного качества по трехфазной магистральной линии электропередачи трехпроводного исполнения // Вестн. Ижев. гос. техн. ун-та. 2008. № 3 (39). С. 130-134.
9. Большанина Л.Ю., Марьясова Е.Г., Большанин Г.А. Особенности распространения электрической энергии по многопроводным линиям электропередачи // Труды Братского государственного университета. Сер. Естественные и инженерные науки. 2011. Т. 2. С. 38-43.
10. Большанин Г.А. Распределение электрической энергии пониженного качества по участкам электроэнергетической системы // Там же. 2006. Т. 2. С. 129-140.
11. Большанин Г.А., Большанина Л.Ю. Параметры трехпроводной ЛЭП. Метод восьмиполосника. Братск: Изд-во БрГУ, 2012. 259 с.
12. Большанин Г.А., Большанина Л.Ю. Определение коэффициентов восьмиполосника, замещающего трехпроводную ЛЭП // Mezdunarodnyj naucno-issledovatel'skij zurnal. 2012. № 6 (6). С. 38-41.
13. Большанин Г.А., Большанина Л.Ю. Определение коэффициентов восьмиполосника, замещающего трехфазную трехпроводную линию электропередачи // Электротехнические комплексы и системы управления. 2013. № 1 (29). 2013. С. 41-46.
14. Большанин Г.А. Большанина Л.Ю. Элементы трехпроводной линии электропередачи в теории многополосников // Materialy IX mezinárodní vědecko-praktická konference «Moderní vymoženosti věda – 2013» – Díl 76. Technické vědy: Praha. Publishing House «Education and Science» s.r.o. S. 24-28.
15. Большанин Г.А., Большанина Л.Ю. Способ определения коэффициентов восьмиполосника, замещающего трехфазную трехпроводную линию электропередачи // Труды Братского государственного университета. Сер. Естественные и инженерные науки. 2012. Т. 3. С. 136-145.

16. Большанин Г.А., Большанина Л.Ю. Использование теории восьмиполосников для анализа передачи электрической энергии // Там же. С. 132-136.

17. Большанин Г.А., Большанина Л.Ю. Определение вторичных параметров однородного участка трехпроводной линии электропередачи методом восьмиполосника // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2013. № 2 (38). С. 232-237.

18. Большанин Г.А., Большанина Л.Ю. Определение первичных параметров однородного участка трехпроводной линии электропередачи методом восьмиполосника // Воздушные линии. 2013. № 2 (11). С. 8-14.

19. Большанин Г.А., Большанина Л.Ю. Восьмиполосники как элементы трехфазной трехпроводной линии электропередачи // Главный энергетик. 2013. № 5. С. 19-25.

References

1. Bolshanin G.A. Ten R.V., Plotnikov M.P. Load matching with an electric network for improving electric energy quality // Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Estestvennye i inzhenernye nauki. 2008. No. 2. P. 92-95.

2. Bolshanin G. A. Features of transportation of electric energy on three-wire power lines // Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Estestvennye i inzhenernye nauki. 2010. Vol. 2. P. 64-68.

3. Kozlov V.A., Bolshanin G.A. Matched operating mode of homogeneous three-wire high-voltage line as a means of increasing the working reliability of hydroelectric power station // Bratskaja GES: istorija stroitelstva, opyt ekspluatatsii, perspektivy: Tr. Vseros. nauch.-prakt. konf. Bratsk, 2011. P. 77-81.

4. Bolshanin G.A, Bolshanina L.Yu., Maryasova E.G. Electric power line as an object of systems analysis // Materialy VII Miedzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji konferencji «Perspektywiczne opracowania sa nauka i technikami – 2011» Vol. 55. Techniczne nauki.: Przemysl. Nauka I studia. P. 103-105.

5. Bolshanin G.A. Bolshanina L.Yu. Features of electric energy distribution on three-wire power line // Sovremennye tehnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie. 2010. No. 4 (28). P. 197-204.

6. Bolshanin G.A. Distribution of electric energy on sections of electrical power systems: monograph. 2 vol. Bratsk: BrGU, 2006. 807 p.

7. Bolshanin G.A., Bolshanina L.Yu. Three-wire high voltage line parameters. Method of eight-terminal circuit. Bratsk: Izd-vo BrGU, 2012. 259 p.

8. Bolshanin, G.A., Bolshanina L.Yu. Distribution of electric energy of the lowered quality on a three-phase three-wire main power line. // Vestn. Izhev. gos. tehn. un-ta. 2008. № 3 (39). P. 130-134.

9. Bolshanin G.A. Bolshanina L.Yu. Maryasova E.G. Features of electric energy distribution on multiwire power lines // Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Estestvennye i inzhenernye nauki. 2011. Vol. 2. P. 38-43.

10. Bolshanin G.A. Distribution of electric energy of the lowered quality on sections of electrical power system // Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Estestvennye i inzhenernye nauki. 2006. Vol. 2. P. 129-140.

11. Bolshanin G.A., Bolshanina L.Yu. Three-wire high voltage line parameters. Method of eight-terminal circuit. Bratsk: Izd-vo BrGU, 2012. 259 p.

12. Bolshanin G.A., Bolshanina L.Yu. Determination of coefficients of eight-terminal circuit replacing three-wire high voltage line // Mezdunarodnyj naucno-issledovatel'skij zurnal. 2012. No. 6 (6). P. 38-41.

13. Bolshanin G.A., Bolshanina L.Yu. Dedetermination of coefficients of eight-terminal circuit replacing three-phase three-wire power line // Elektrotehnicheskie komplekxy i sistemy upravlenija. 2013. № 1 (29). P. 41-46.

14. Bolshanin G.A. Bolshanina L.Yu. Three-wire power line elements in the multiterminal circuit theory // Materiály IX mezinárodní vědecko-praktická konference «Moderní vymoženosti věda – 2013» – Díl 76. Technické vědy: Praha. Publishing House «Education and Science» s.r.o. P. 24-28.

15. Bolshanin G.A., Bolshanina L.Yu. Way of determination of eight-terminal circuit coefficients replacing a three-phase three-wire power line // Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Estestvennye i inzhenernye nauki. 2012. Vol. 3. P. 136-145.

16. Bolshanin G.A., Bolshanina L.Yu. Use of eight-terminal circuit theory for analyzing electric energy transfer // Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Estestvennye i inzhenernye nauki. 2012. Vol. 3. P. 132-136.

17. Bolshanin G.A., Bolshanina L.Yu.. Determination of secondary parameters of a homogeneous section of a three-wire power line by using the method of eight-terminal circuit. // Sovremennye tehnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie. 2013. No. 2 (38). P. 232-237.

18. Bolshanin G.A., Bolshanina L.Yu. Determination of primary parameters of a homogeneous section of a three-wire power line by using the method of eight-terminal circuit. // Vozdushnye linii. 2013. № 2 (11). P. 8-14.

19. Bolshanin G.A., Bolshanina L.Yu. Eight-terminal circuits as elements of a three-phase three-wire power line // Glavnij energetik. 2013. № 5. P. 19-25.

УДК 003.26; 004.056

IT-технологии в вопросах обеспечения информационной безопасности предприятий

М.Ю. Иванов

Братский государственный университет, Макаренко 40, Братск, Россия
nis@brstu.ru

Статья получена 16.12.2013, принята 17.02.2014

Представлены результаты исследований базовых математических и алгоритмических аспектов симметричных и асимметричных криптографических преобразований на примере шифров RC4 и Эль-Гамала, а также выработки и проверки электронной цифровой подписи. Рассмотрен спектр интересов субъектов информационных отношений с привязкой к категориям информационной безопасности. Проанализированы достоинства и недостатки симметричных и асимметричных методов криптографии. Приведены фрагменты кода, описывающего глобальные переменные, массив данных, заполнение массива и функцию, реализующую шифрование байта исходной информации с помощью шифра RC4. Предложен эффективный криптоалгоритм, надежность которого обусловлена сложностью вычисления дискретных логарифмов, с описанием процесса шифрования и дешифрования текста, генерации пары ключей, вычисления открытого ключа и формирования цифровой подписи с последующей ее верификацией. Показана возможность автоматизированного шифрования текстовых данных на основе дискретного логарифмирования и формирования электронной цифровой подписи, являющейся эффективным средством подтверждения подлинности и авторства информации в электронной форме.

Ключевые слова: информационная безопасность, шифрование, симметричные и асимметричные криптографические системы, электронная цифровая подпись, программное обеспечение.