

УДК 621.311.004.12

**Г.А. Большанин**

Братский государственный университет, Братск, Россия

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ  
ВОСЬМИПОЛЮСНИКА С ДВУМЯ ВХОДНЫМИ  
И ШЕСТЬЮ ВЫХОДНЫМИ ВЫВОДАМИ**

Восьмиполюсники различных исполнений, а именно восьмиполюсники с двумя входными и шестью выходными выводами, восьмиполюсники с тремя входными и пятью выходными выводами, восьмиполюсники с четырьмя входными и четырьмя выходными выводами, восьмиполюсники с пятью входными и тремя выходными выводами, восьмиполюсники с шестью входными и двумя выходными выводами необходимы для замещения некоторых энергетических объектов. Особенно тогда, когда интерес представляют лишь входные и выходные характеристики электрической энергии. Особенности состояния восьмиполюсника описываются уравнениями различных форм. Для описания состояния восьмиполюсника с двумя входными и шестью выходными выводами в силовой энергетике чаще всего используются уравнения А-формы. А для реализации этих уравнений необходимо иметь сведения о численных значениях соответствующих коэффициентов. В статье представлен один из возможных вариантов экспериментального определения этих коэффициентов. Для экспериментального определения численных значений коэффициентов уравнений А-формы, описывающих состояние восьмиполюсника с двумя входными и шестью выходными выводами, требуется выполнить десять опытов. Результаты этих опытов позволят получить численные значения компонентов десяти вариантов уравнений А-формы. Совместное решение этих уравнений позволит определить численные значения коэффициентов уравнений А-формы, оценивающих состояние пассивного восьмиполюсника с двумя входными и шестью выходными выводами. В принципе они могут быть использованы и для оценивания состояния активных восьмиполюсников аналогичного исполнения. Численные значения этих коэффициентов позволят определить численные значения коэффициентов уравнений иных форм, описывающих состояние этого же восьмиполюсника. Сведения о численных значениях коэффициентов восьмиполюсника позволят установить количественную связь между входными и выходными характеристиками электрической энергии.

**Ключевые слова:** восьмиполюсник, коэффициенты восьмиполюсника, схема эксперимента, напряжения, токи, опыт холостого хода, опыт короткого замыкания, вольтметр, амперметр, фазометр.

**G.A. Bolshanyn**

Bratsk State University, Bratsk, Russian Federation

## **EXPERIMENTAL DETERMINATION OF EIGHT-POLE FACTORS WITH TWO INPUT AND SIX OUTPUT OUTPUTS**

Eight-ports of different designs, namely eight-ports with two input and six output terminals, eight-ports with three input and five output outputs, eight-ports with four input and four output terminals, eight-poles with five input and three output terminals, eight-ports with six input terminals and two output terminals are needed to replace some energy objects. Especially when only the input and output characteristics of electrical energy are of interest. The singularities of the state of the eight-terminal network are described by the equations of various forms. To describe the state of an eight-terminal network with two input and six output terminals in power engineering, the A-form equations are most often used. And for the realization of these equations it is necessary to have information about the numerical values of the corresponding coefficients. The article presents one of the possible variants of the experimental determination of these coefficients. For the experimental determination of the numerical values of the coefficients of the A-form equations describing the state of the eight-terminal network with two input and six output terminals, it is required to perform ten experiments. The results of these experiments will make it possible to obtain the numerical values of the components of the ten variants of the A-form equations. A joint solution of these equations will allow us to determine the numerical values of the coefficients of the A-form equations estimating the state of the passive eight-terminal network with two input and six output pins. In principle, they can be used to evaluate the state of active eight-ports of a similar design. The numerical values of these coefficients will allow us to determine the numerical values of the coefficients of equations of other forms describing the state of the same eight-terminal network. Information on the numerical values of the coefficients of the eight-terminal network will make it possible to establish a quantitative relationship between the input and output characteristics of electrical energy.

**Keywords:** eight-terminal network, eight-terminal network coefficients, experiment circuit, voltages, currents, no-load test, short circuit test, voltmeter, ammeter, phase meter.

Восьмиполюсники – это одна из разновидностей многополюсников. Идея замещения электротехнических объектов многополюсниками возникла давно [1, 2]. Но до недавнего времени основное внимание уделялось теории четырехполюсников. Теория многополюсников рассматривалась в основном применительно к устройствам связи [3, 4]. Позже возможность применения теории многополюсников стали рассматривать при синтезе и анализе электрических цепей [5], в силовой энергетике [6–8], в электронике [9], в системах автоматического управления промышленными технологиями [10] и даже в механике [11, 12]. Исследования по выявлению свойств и функциональных особенностей многополюсников продолжают [13].

Восьмиполюсником называют часть электрической цепи, электротехнического устройства или электроэнергетической системы с восемью выводами. Эти выводы делятся на входные и выходные, причем их соотношение может быть самым разнообразным. Разнообразие этих соотношений обуславливает различие модификаций восьмиполюсников.

Восьмиполюсники могут иметь два выходных и шесть выходных, три входных и пять выходных, четыре входных и четыре выходных, пять входных и три выходных, шесть входных и два выходных вывода. К входным выводам обычно подключаются внешние источники электрической энергии или устройства, являющиеся посредниками между источниками электрической энергии и восьмиполюсником, а к выходным – потребители этой энергии.

Обычно восьмиполюсник представляет собой «черный ящик», внутреннее содержание которого чаще всего не известно. Интерес в этом случае представляют лишь входные и выходные характеристики электрической энергии.

Восьмиполюсник может иметь два входных и шесть выходных выводов (рис. 1). Таким шестиполюсником может быть замещен, например, многообмоточный трансформатор или часть какой-либо электрической цепи, электротехнического устройства или электроэнергетической системы.

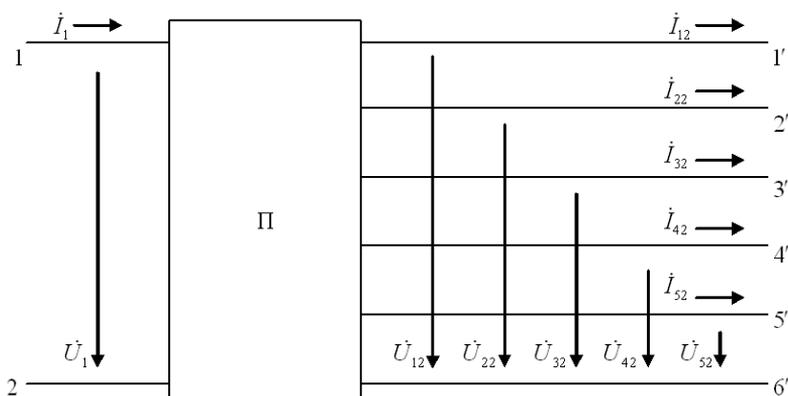


Рис. 1. Пассивный восьмиполюсник с двумя входными и шестью выходными выводами

Состояние восьмиполюсника, а следовательно, и объекта, который он замещает, описывается уравнениями различных форм. В силовой энергетике, например, состояние такого восьмиполюсника, а значит, и объекта электроэнергетики, который он замещает, предпочитают описывать уравнениями А-формы. Хотя это не принципиально, тем более когда установлена количественная связь между коэффициентами уравнений различных форм. Но необходимо иметь сведения о численных значениях коэффициентов уравнений хотя бы одной из форм.

Состояние восьмиполюсника с двумя входными и шестью выходными выводами чаще всего в силовой электроэнергетике оценивается уравнениями А-формы:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{11} &= A\dot{U}_{12} + B\dot{I}_{12} + N\dot{U}_{22} + O\dot{I}_{22} + P\dot{U}_{32} + Q\dot{I}_{32} + R\dot{U}_{42} + S\dot{I}_{42} + \\ &+ V\dot{U}_{52} + W\dot{I}_{52}, \\ \dot{I}_{11} &= C\dot{U}_{12} + D\dot{I}_{12} + E\dot{U}_{22} + F\dot{I}_{22} + G\dot{U}_{32} + H\dot{I}_{32} + J\dot{U}_{42} + K\dot{I}_{42} + \\ &+ L\dot{U}_{52} + M\dot{I}_{52}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $A, B, C, D, E, F, G, H, J, K, L, M, N, O, P, R, S, V$  и  $W$  – коэффициенты уравнений А-формы, описывающих состояние восьмиполюсника с двумя входными и шестью выходными выводами.

Всего два уравнения. Но в этих уравнениях 20 (двадцать) неизвестных коэффициентов. Нужно дополнительно 18 (восемнадцать) уравнений. Только тогда можно будет вычислить неизвестные коэффициенты и то лишь при известных всех входных и всех выходных напряжениях и токах. Их можно определить при известном схемном решении анализируемого восьмиполюсника. Но чаще всего внутреннее содержание восьмиполюсника не известно. В таком случае входные и выходные напряжения и токи можно определить только экспериментально.

На рис. 2 изображена возможная схема экспериментальной установки для определения численных значений коэффициентов восьмиполюсника с двумя входными и шестью выходными выводами.

В предлагаемой на рис. 2 схеме экспериментальной установки участвует одна ЭДС синусоидальной формы. При выполнении серии экспериментов по этой схеме необходимо использовать парк электроизмерительных приборов, состоящий из 6 (шести) амперметров РА1–РА6, 6 (шести) вольтметров PV1–PV6 и 11 (одиннадцати) фазометров Рф1 – Рф11. Кроме того, для экспериментов необходимы 11 (одиннадцать) коммутационных устройств S1–S11, в качестве которых могут быть использованы ключи, выключатели, переключатели или разъединители. В качестве электрических нагрузок Н1–Н5 могут быть использованы линейные резисторы, хотя в качестве этих нагрузок можно использовать любые потребители электрической энергии с линейными вольтамперными характеристиками.

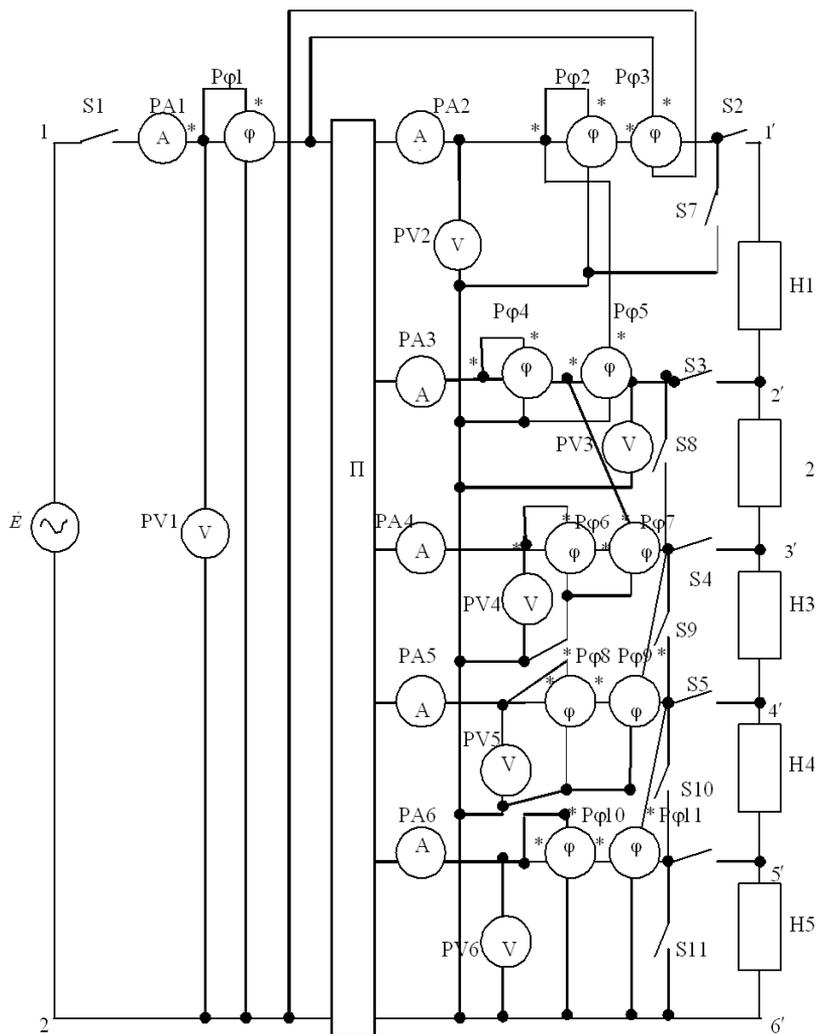


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для определения численных значений коэффициентов восьмиполусника с двумя входными и шестью выходными выводами

Для достижения желаемого результата необходимо выполнить серию экспериментов из десяти опытов. Цель этих опытов заключается в определении изображений на комплексной плоскости входных и выходных напряжений и токов, т.е. в определении их модулей и начальных фаз.

Начальная фаза ЭДС источника электрической энергии обычно известна. Если нет, то ее следует задать априори. Чаще всего ей присваивается нулевое значение. Если не учитывать внутреннее сопротивление источника электрической энергии, то при замкнутом ключе S1

величина ЭДС  $\dot{E}$  дублирует входное напряжение  $\dot{U}_{11}$ , модуль которого измеряется вольтметром PV1. Равны и их начальные фазы. Получается, что начальная фаза входного напряжения  $\varphi_{u11}$  заранее известна и чаще всего она равна нулю  $\varphi_{u11} = 0$ .

Схема экспериментальной установки на рис. 2 скомпонована так, чтобы с помощью показаний указанных здесь приборов можно было бы сформировать изображения на комплексной плоскости всех входных и всех выходных напряжений и токов.

Это формирование должно выполняться в режиме передачи электрической энергии через анализируемый восьмиполосник электрическим нагрузкам Н1–Н5. Но это вовсе не означает, что именно этот режим нужно реализовать в процессе предлагаемых здесь экспериментальных исследований. Конечная цель этих исследований заключается в формировании равенств, отличающихся по возможности минимальной громоздкостью, для вычисления коэффициентов уравнений А-формы, оценивающих состояние восьмиполосника с двумя входными и шестью выходными выводами.

**Первый опыт** может быть опытом холостого хода. Он выполняется размыканием ключей S2 – S11. Ключ S1 при этом должен быть замкнут. Этот опыт характерен отсутствием выходных токов:  $\dot{i}_{12}^{(1)} = \dot{i}_{22}^{(1)} = \dot{i}_{32}^{(1)} = \dot{i}_{42}^{(1)} = \dot{i}_{52}^{(1)} = 0$ . Это подтверждается нулевыми показаниями амперметров PA2 – PA6.

Модули входных напряжения  $\dot{U}_{11}^{(1)}$  и тока  $\dot{I}_{11}^{(1)}$  регистрируют вольтметр PV1 и амперметр PA1 соответственно. Фазометр Pφ1 регистрирует разность начальных фаз входных напряжения и тока:  $\varphi_1 = \varphi_{u11} - \varphi_{i11}$ . При известной начальной фазе входного напряжения  $\varphi_{u11}$  в таком случае не сложно определить начальную фазу входного тока:  $\varphi_{i11} = \varphi_{u11} - \varphi_1$ . Таким образом, определились изображения входных напряжения и тока на комплексной плоскости:  $\dot{U}_{11}^{(1)} = U_{11}^{(1)} e^{j\varphi_{u11}}$ ;  $\dot{I}_{11}^{(1)} = I_{11}^{(1)} e^{j\varphi_{i11}}$ .

Модули выходных напряжений  $\dot{U}_{12}^{(1)}$ ,  $\dot{U}_{22}^{(1)}$ ,  $\dot{U}_{32}^{(1)}$ ,  $\dot{U}_{42}^{(1)}$  и  $\dot{U}_{52}^{(1)}$  регистрируют вольтметры PV2, PV3, PV4, PV5 и PV6 соответственно. Чтобы определить начальные фазы этих напряжений, необходимо изменить указанную на рис. 2 схему подключения фазометров Pφ2, Pφ4, Pφ6, Pφ8 и Pφ10.

Токовую обмотку фазометра  $P\phi 2$  следует переключить на входной вывод 1. Тогда этот фазометр зарегистрирует разность начальных фаз выходного напряжения  $\dot{U}_{12}^{(1)}$  и входного тока  $\dot{I}_{11}^{(1)}$ :  $\phi_2 = \phi_{u12} - \phi_{i11}$ . По таким показаниям фазометра несложно определить начальную фазу выходного напряжения  $\dot{U}_{12}^{(1)}$ :  $\phi_{u12} = \phi_2 + \phi_{i11}$ .

Токовую обмотку фазометра  $P\phi 4$  тоже следует переключить на входной вывод 1. Тогда этот фазометр зарегистрирует разность начальных фаз выходного напряжения  $\dot{U}_{22}^{(1)}$  и входного тока  $\dot{I}_{11}^{(1)}$ :  $\phi_4 = \phi_{u22} - \phi_{i11}$ . В таком случае начальная фаза выходного напряжения  $\dot{U}_{22}^{(1)}$  определится так:  $\phi_{u22} = \phi_4 + \phi_{i11}$ .

Токовую обмотку фазометра  $P\phi 6$  нужно тоже переключить с выходного вывода 3' на входной вывод 1 для того, чтобы этот фазометр зарегистрировал разность начальных фаз выходного напряжения  $\dot{U}_{32}^{(1)}$  и входного тока  $\dot{I}_{11}^{(1)}$ :  $\phi_6 = \phi_{u32} - \phi_{i11}$ . Этот факт дает возможность определения начальной фазы выходного напряжения  $\dot{U}_{32}^{(1)}$ :  $\phi_{u32} = \phi_6 + \phi_{i11}$ .

Для определения начальной фазы выходного напряжения  $\dot{U}_{42}^{(1)}$  необходимо токовую обмотку фазометра  $P\phi 8$  переключить на входной вывод 1. Тогда этот фазометр зарегистрирует разность начальных фаз выходного напряжения  $\dot{U}_{42}^{(1)}$  и входного тока  $\dot{I}_{11}^{(1)}$ :  $\phi_8 = \phi_{u42} - \phi_{i11}$ . В таком случае начальная фаза выходного напряжения  $\dot{U}_{42}^{(1)}$  определится так:  $\phi_{u42} = \phi_8 + \phi_{i11}$ . При переключении токовой обмотки фазометра  $P\phi 10$  на входной вывод 1 этот фазометр зарегистрирует разность начальных фаз выходного напряжения  $\dot{U}_{52}^{(1)}$  и входного тока  $\dot{I}_{11}^{(1)}$ :  $\phi_{10} = \phi_{u52} - \phi_{i11}$ . Тогда начальная фаза выходного напряжения  $\dot{U}_{52}^{(1)}$  определится следующим образом:  $\phi_{u52} = \phi_{10} + \phi_{i11}$ .

Таким образом, определяются изображения выходных напряжений на комплексной плоскости:  $\dot{U}_{12}^{(1)} = U_{12}^{(1)} e^{j\phi_{u12}}$ ;  $\dot{U}_{22}^{(1)} = U_{22}^{(1)} e^{j\phi_{u22}}$ ;  $\dot{U}_{32}^{(1)} = U_{32}^{(1)} e^{j\phi_{u32}}$ ;  $\dot{U}_{42}^{(1)} = U_{42}^{(1)} e^{j\phi_{u42}}$ ;  $\dot{U}_{52}^{(1)} = U_{52}^{(1)} e^{j\phi_{u52}}$ .

По результатам первого опыта уравнения (1) примут вид:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{11}^{(1)} &= A\dot{U}_{12}^{(1)} + N\dot{U}_{22}^{(1)} + P\dot{U}_{32}^{(1)} + R\dot{U}_{42}^{(1)} + V\dot{U}_{52}^{(1)}, \\ \dot{I}_{11}^{(1)} &= C\dot{U}_{12}^{(1)} + E\dot{U}_{22}^{(1)} + G\dot{U}_{32}^{(1)} + J\dot{U}_{42}^{(1)} + L\dot{U}_{52}^{(1)}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

**Второй опыт** может быть опытом короткого замыкания. Во избежание аварийной ситуации этот опыт следует выполнять при пониженном напряжении источника электрической энергии. Он выполняется замыканием ключей S1 и S7–S11, а также размыканием ключей S2–S6. Этот опыт характерен отсутствием выходных напряжений:  $\dot{U}_{12}^{(2)} = \dot{U}_{22}^{(2)} = \dot{U}_{32}^{(2)} = \dot{U}_{42}^{(2)} = \dot{U}_{52}^{(2)} = 0$ . Этот факт подтверждается нулевыми показаниями вольтметров PV2–PV6.

Изображения входных напряжения и тока на комплексной плоскости в этом опыте определяются так же, как и в первом опыте.

Модули выходных токов  $\dot{I}_{12}^{(2)}$ ,  $\dot{I}_{22}^{(2)}$ ,  $\dot{I}_{32}^{(2)}$ ,  $\dot{I}_{42}^{(2)}$  и  $\dot{I}_{52}^{(2)}$  регистрируются амперметрами PA2, PA3, PA4, PA5 и PA6 соответственно.

При включении фазометра Pφ3 так, как показано на рис. 2, он зарегистрирует разность начальных фаз входного напряжения  $\dot{U}_{11}^{(2)}$  и выходного тока  $\dot{I}_{12}^{(2)}$ :  $\varphi_3 = \varphi_{u11} - \varphi_{i12}$ . Тогда начальная фаза выходного тока  $\dot{I}_{12}^{(2)}$  определится так:  $\varphi_{i12} = \varphi_{u11} - \varphi_3$ .

Если обмотку напряжения фазометра Pφ4 подключить к входным выводам 1 и 2, то этот фазометр покажет разность начальных фаз входного напряжения  $\dot{U}_{11}^{(2)}$  и выходного тока  $\dot{I}_{22}^{(2)}$ :  $\varphi_4 = \varphi_{u11} - \varphi_{i22}$ . Отсюда начальная фаза выходного тока  $\dot{I}_{22}^{(2)}$ :  $\varphi_{i22} = \varphi_{u11} - \varphi_4$ .

При подключении обмотки напряжения фазометра Pφ6 к входным выводам 1 и 2 этот фазометр зарегистрирует при условии сохранения его токовых характеристик в том виде, как это показано на рис. 2, разность начальных фаз входного напряжения  $\dot{U}_{11}^{(2)}$  и выходного тока  $\dot{I}_{32}^{(2)}$ :  $\varphi_6 = \varphi_{u11} - \varphi_{i32}$ . В таком случае начальная фаза выходного тока  $\dot{I}_{32}^{(2)}$  определится следующим образом:  $\varphi_{i32} = \varphi_{u11} - \varphi_6$ .

Если обмотку напряжения фазометра Pφ8 переключить на входные выводы 1 и 2, то этот фазометр сможет зарегистрировать разность начальных фаз входного напряжения  $\dot{U}_{11}^{(2)}$  и выходного тока  $\dot{I}_{42}^{(2)}$ :  $\varphi_8 = \varphi_{u11} - \varphi_{i42}$ . Поэтому начальная фаза этого тока определится так:

$\varphi_{i42} = \varphi_{u11} - \varphi_8$ . Переключение обмотки напряжения фазометра  $P\varphi 10$  на входные выводы 1 и 2 создает возможность измерения разности начальных фаз входного напряжения  $\dot{U}_{11}^{(2)}$  и выходного тока  $\dot{i}_{52}^{(2)}$ :  $\varphi_{10} = \varphi_{u11} - \varphi_{i52}$ . По таким показаниям фазометра несложно определить начальную фазу выходного тока  $\dot{i}_{52}^{(2)}$ :  $\varphi_{i52} = \varphi_{u11} - \varphi_{10}$ .

По результатам выполненных действий приобретаются сведения об изображениях на комплексной плоскости выходных токов:  $\dot{i}_{12}^{(2)} = I_{12}^{(2)} e^{j\varphi_{i12}}$ ;  $\dot{i}_{22}^{(2)} = I_{22}^{(2)} e^{j\varphi_{i22}}$ ;  $\dot{i}_{32}^{(2)} = I_{32}^{(2)} e^{j\varphi_{i32}}$ ;  $\dot{i}_{42}^{(2)} = I_{42}^{(2)} e^{j\varphi_{i42}}$ ;  $\dot{i}_{52}^{(2)} = I_{52}^{(2)} e^{j\varphi_{i52}}$ .

Уравнения (1) в результате выполнения опыта короткого замыкания примут вид:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{11}^{(2)} &= B\dot{i}_{12}^{(2)} + O\dot{i}_{22}^{(2)} + Q\dot{i}_{32}^{(2)} + S\dot{i}_{42}^{(2)} + W\dot{i}_{52}^{(2)}, \\ \dot{i}_{11}^{(2)} &= D\dot{i}_{12}^{(2)} + F\dot{i}_{22}^{(2)} + H\dot{i}_{32}^{(2)} + K\dot{i}_{42}^{(2)} + M\dot{i}_{52}^{(2)}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

**Третий опыт** может быть выполнен при отключении электрических нагрузок Н1–Н5. При этом выходные выводы 1' и б' должны быть замкнуты накоротко.

Условия исполнения этого опыта достигаются размыканием ключей S2–S6, S8–S11 и замыканием ключей S1 и S7. Исполняемый таким образом опыт характеризуется отсутствием выходных напряжения  $\dot{U}_{12}^{(3)}$  и токов  $\dot{i}_{22}^{(3)}$ ,  $\dot{i}_{32}^{(3)}$ ,  $\dot{i}_{42}^{(3)}$  и  $\dot{i}_{52}^{(3)}$ :  $\dot{U}_{12}^{(3)} = 0$ ;  $\dot{i}_{22}^{(3)} = \dot{i}_{32}^{(3)} = \dot{i}_{42}^{(3)} = \dot{i}_{52}^{(3)} = 0$ .

Изображения на комплексной плоскости входных напряжения  $\dot{U}_{11}^{(3)}$  и тока  $\dot{i}_{11}^{(3)}$  здесь определяются точно так же, как и в первом опыте. Модули выходного тока  $\dot{i}_{12}^{(3)}$  выходных напряжений  $\dot{U}_{22}^{(3)}$ ,  $\dot{U}_{32}^{(3)}$ ,  $\dot{U}_{42}^{(3)}$  и  $\dot{U}_{52}^{(3)}$  регистрируют амперметр PA2 и вольтметры PV3, PV4, PV5 и PV6 соответственно.

Фазометр  $P\varphi 3$ , если он подключен к восьмиполюснику так, как показано на рис. 2, покажет разность начальных фаз входного напряжения  $\dot{U}_{11}^{(3)}$  и выходного тока  $\dot{i}_{12}^{(3)}$ :  $\varphi_3 = \varphi_{u11} - \varphi_{i12}$ . Отсюда можно определить начальную фазу выходного тока  $\dot{i}_{12}^{(3)}$ :  $\varphi_{i12} = \varphi_{u11} - \varphi_3$ .

Для определения начальных фаз выходных напряжений  $\dot{U}_{22}^{(3)}$ ,  $\dot{U}_{32}^{(3)}$ ,  $\dot{U}_{42}^{(3)}$  и  $\dot{U}_{52}^{(3)}$  необходимо изменить схемы подключения фазометров  $P\varphi 4$ ,  $P\varphi 6$ ,  $P\varphi 8$  и  $P\varphi 10$ , а именно переключить их токовые

обмотки на выходной вывод 1'. В результате таких изменений схемы экспериментальной установки фазометр Рф4 регистрирует разность начальных фаз входных напряжения  $\dot{U}_{22}^{(3)}$  и тока  $\dot{I}_{12}^{(3)}$ :  $\varphi_4 = \varphi_{u22} - \varphi_{i12}$ ; фазометр Рф6 – разность начальных фаз выходных напряжения  $\dot{U}_{32}^{(3)}$  и тока  $\dot{I}_{12}^{(3)}$ :  $\varphi_6 = \varphi_{u32} - \varphi_{i12}$ ; фазометр Рф8 – разность начальных фаз выходных напряжения  $\dot{U}_{42}^{(3)}$  и тока  $\dot{I}_{12}^{(3)}$ :  $\varphi_8 = \varphi_{u42} - \varphi_{i12}$ ; а фазометр Рф10 – разность начальных фаз выходных напряжения  $\dot{U}_{52}^{(3)}$  и тока  $\dot{I}_{12}^{(3)}$ :  $\varphi_{10} = \varphi_{u52} - \varphi_{i12}$ . В таком случае искомые начальные фазы выходных напряжений определяются так:  $\varphi_{u22} = \varphi_4 + \varphi_{i12}$ ;  $\varphi_{u32} = \varphi_6 + \varphi_{i12}$ ;  $\varphi_{u42} = \varphi_8 + \varphi_{i12}$ ;  $\varphi_{u52} = \varphi_{10} + \varphi_{i12}$ .

Так формируются изображения выходных тока и напряжений на комплексной плоскости:  $\dot{I}_{12}^{(3)} = I_{12}^{(3)} e^{j\varphi_{i12}}$ ;  $\dot{U}_{22}^{(3)} = U_{22}^{(3)} e^{j\varphi_{u22}}$ ;  $\dot{U}_{32}^{(3)} = U_{32}^{(3)} e^{j\varphi_{u32}}$ ;  $\dot{U}_{42}^{(3)} = U_{42}^{(3)} e^{j\varphi_{u42}}$ ;  $\dot{U}_{52}^{(3)} = U_{52}^{(3)} e^{j\varphi_{u52}}$ .

С учетом результатов третьего опыта уравнения (1) переписутся следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{11}^{(3)} &= B\dot{I}_{12}^{(3)} + N\dot{U}_{22}^{(3)} + P\dot{U}_{32}^{(3)} + R\dot{U}_{42}^{(3)} + V\dot{U}_{52}^{(3)}, \\ \dot{I}_{11}^{(3)} &= D\dot{I}_{12}^{(1)} + E\dot{U}_{22}^{(3)} + G\dot{U}_{32}^{(3)} + J\dot{U}_{42}^{(3)} + L\dot{U}_{52}^{(3)}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

**Четвертый опыт** предполагает отключение электрических нагрузок Н1–Н5 и замыкание выходных выводов 2' и 6' между собой.

Этот опыт выполняется размыканием ключей S2–S7, S9–S11 и замыканием ключей S1, S8. Он характеризуется отсутствием выходных токов  $\dot{I}_{12}^{(4)}$ ,  $\dot{I}_{32}^{(4)}$ ,  $\dot{I}_{42}^{(4)}$ ,  $\dot{I}_{52}^{(4)}$  и напряжения  $\dot{U}_{22}^{(4)}$ :  $\dot{I}_{12}^{(4)} = \dot{I}_{32}^{(4)} = \dot{I}_{42}^{(4)} = \dot{I}_{52}^{(4)} = 0$ ;  $\dot{U}_{22}^{(4)} = 0$ . Этот факт подтверждается нулевыми показаниями амперметров РА2, РА4–РА6 и вольтметра РВ3. Изображения на комплексной плоскости входных напряжения  $\dot{U}_{11}^{(4)}$  и тока  $\dot{I}_{11}^{(4)}$  в четвертом опыте определяются так же, как и в первом.

Модули выходных напряжений  $\dot{U}_{12}^{(4)}$ ,  $\dot{U}_{32}^{(4)}$ ,  $\dot{U}_{42}^{(4)}$ ,  $\dot{U}_{52}^{(4)}$  и тока  $\dot{I}_{22}^{(4)}$  регистрируются вольтметрами РВ2, РВ3–РВ6 и амперметром РА3.

Чтобы определить начальную фазу выходного напряжения  $\dot{U}_{12}^{(4)}$ , необходимо токовую обмотку фазометра Рф2 переключить на входной вывод 1. В результате этого действия фазометр Рф2 сможет

зарегистрировать разность начальных фаз выходного напряжения  $\dot{U}_{12}^{(4)}$  и входного тока  $\dot{I}_{11}^{(4)}$ :  $\varphi_2 = \varphi_{u12} - \varphi_{i11}$ . Начальная фаза выходного напряжения  $\dot{U}_{12}^{(4)}$  в таком случае определится так:  $\varphi_{u12} = \varphi_2 + \varphi_{i11}$ .

Фазометр Рф5, если он подключен так, как показано на рис. 2, измеряет разность начальных фаз выходных напряжения  $\dot{U}_{12}^{(4)}$  и тока  $\dot{I}_{22}^{(4)}$ :  $\varphi_5 = \varphi_{u12} - \varphi_{i22}$ . Отсюда определяется начальная фаза выходного тока  $\dot{I}_{22}^{(4)}$ :  $\varphi_{i22} = \varphi_{u12} - \varphi_5$ .

Переключение токовой обмотки фазометра Рф6 на выходной вывод 2' дает возможность измерения этим фазометром разность начальных фаз выходных напряжения  $\dot{U}_{32}^{(4)}$  и тока  $\dot{I}_{22}^{(4)}$ :  $\varphi_6 = \varphi_{u32} - \varphi_{i22}$ . Теперь несложно определить начальную фазу выходного напряжения  $\dot{U}_{32}^{(4)}$ :  $\varphi_{u32} = \varphi_6 - \varphi_{i22}$ .

Если токовую обмотку фазометра Рф8 переключить на выходной вывод 2', то появится возможность регистрации разности начальных фаз выходных напряжения  $\dot{U}_{42}^{(4)}$  и тока  $\dot{I}_{22}^{(4)}$ :  $\varphi_8 = \varphi_{u42} - \varphi_{i22}$ . Тогда начальная фаза выходного напряжения  $\dot{U}_{42}^{(4)}$  определится так:  $\varphi_{u42} = \varphi_8 + \varphi_{i22}$ .

Для определения начальной фазы напряжения  $\dot{U}_{52}^{(4)}$  токовую обмотку фазометра Рф10 нужно тоже переключить на выходной вывод 2'. Тогда этот фазометр измерит разность начальных фаз выходных напряжения  $\dot{U}_{52}^{(4)}$  и тока  $\dot{I}_{22}^{(4)}$ :  $\varphi_{10} = \varphi_{u52} - \varphi_{i22}$ . А искомая величина определится так:  $\varphi_{u52} = \varphi_{10} + \varphi_{i22}$ .

Так формируются изображения выходных напряжений и тока на комплексной плоскости:  $\dot{U}_{12}^{(4)} = U_{12}^{(4)} e^{j\varphi_{u12}}$ ;  $\dot{I}_{22}^{(4)} = I_{22}^{(4)} e^{j\varphi_{i22}}$ ;  $\dot{U}_{32}^{(4)} = U_{32}^{(4)} e^{j\varphi_{u32}}$ ;  $\dot{U}_{42}^{(4)} = U_{42}^{(4)} e^{j\varphi_{u42}}$ ;  $\dot{U}_{52}^{(4)} = U_{52}^{(4)} e^{j\varphi_{u52}}$ .

По результатам четвертого опыта уравнения (1) переписутся так:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{11}^{(4)} &= A\dot{U}_{12}^{(4)} + O\dot{I}_{22}^{(4)} + P\dot{U}_{32}^{(4)} + R\dot{U}_{42}^{(4)} + V\dot{U}_{52}^{(4)}, \\ \dot{I}_{11}^{(4)} &= C\dot{U}_{12}^{(4)} + F\dot{I}_{22}^{(4)} + G\dot{U}_{32}^{(4)} + J\dot{U}_{42}^{(4)} + L\dot{U}_{52}^{(4)}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

**Пятый опыт** может быть выполнен отключением электрических нагрузок Н1–Н5 и замыканием между собой выходных выводов 3' и 6'. Он предполагает размыкание ключей S2–S8, S10, S11 и замыкание

ключей S1, S9. Этот опыт характеризуется отсутствием выходных токов  $\dot{I}_{12}^{(5)}$ ,  $\dot{I}_{22}^{(5)}$ ,  $\dot{I}_{42}^{(5)}$ ,  $\dot{I}_{52}^{(5)}$  и напряжения  $\dot{U}_{32}^{(5)}$ :  $\dot{I}_{12}^{(5)} = \dot{I}_{22}^{(5)} = \dot{I}_{42}^{(5)} = \dot{I}_{52}^{(5)} = 0$ ;  $\dot{U}_{32}^{(5)} = 0$ . Это подтверждается нулевыми показаниями амперметров PA2, PA3, PA5, PA6 и вольтметра PV4.

Изображения на комплексной плоскости входных напряжения  $\dot{U}_{11}^{(5)}$  и тока  $\dot{I}_{11}^{(5)}$  здесь определяются так же, как и в первом опыте.

Модули выходных напряжений  $\dot{U}_{12}^{(5)}$ ,  $\dot{U}_{22}^{(5)}$ ,  $\dot{U}_{42}^{(5)}$ ,  $\dot{U}_{52}^{(5)}$  и тока  $\dot{I}_{32}^{(5)}$  измеряются вольтметрами PV2, PV3, PV5, PV6 и амперметром PA4.

Если токовую обмотку фазометра Pφ2 переключить на входной вывод 1, то этот фазометр покажет разность начальных фаз выходного напряжения  $\dot{U}_{12}^{(5)}$  и входного тока  $\dot{I}_{11}^{(5)}$ :  $\varphi_2 = \varphi_{u12} - \varphi_{i11}$ . Тогда начальная фаза выходного напряжения  $\dot{U}_{12}^{(5)}$  определится так:  $\varphi_{u12} = \varphi_2 + \varphi_{i11}$ .

Для определения начальной фазы выходного напряжения  $\dot{U}_{22}^{(5)}$  нужно токовую обмотку фазометра Pφ4 тоже переключить на входной вывод 1. После переключения этот фазометр сможет зафиксировать разность начальных фаз выходных напряжения  $\dot{U}_{22}^{(5)}$  и тока  $\dot{I}_{11}^{(5)}$ :  $\varphi_4 = \varphi_{u22} - \varphi_{i11}$ . Поэтому искомая начальная фаза определится следующим образом:  $\varphi_{u22} = \varphi_4 + \varphi_{i11}$ . Если фазометр Pφ7 подключен так, как показано на рис. 2, то он зарегистрирует разность начальных фаз выходных напряжения  $\dot{U}_{22}^{(5)}$  и тока  $\dot{I}_{32}^{(5)}$ :  $\varphi_7 = \varphi_{u22} - \varphi_{i32}$ . Отсюда можно определить начальную фазу выходного тока  $\dot{I}_{32}^{(5)}$ :  $\varphi_{i32} = \varphi_{u22} - \varphi_7$ .

Переключение токовой обмотки фазометра Pφ8 с выходного вывода 4' на выходной вывод 3' создает возможность измерения разности начальных фаз выходных напряжения  $\dot{U}_{42}^{(5)}$  и тока  $\dot{I}_{32}^{(5)}$ :  $\varphi_8 = \varphi_{u42} - \varphi_{i32}$ . Это обеспечивает возможность определения начальной фазы выходного напряжения  $\dot{U}_{42}^{(5)}$ :  $\varphi_{u42} = \varphi_8 + \varphi_{i32}$ .

Фазометр Pφ10 при переключении его токовой обмотки на выходной вывод 3' будет показывать разность начальных фаз выходных напряжения  $\dot{U}_{52}^{(5)}$  и тока  $\dot{I}_{32}^{(5)}$ :  $\varphi_{10} = \varphi_{u52} - \varphi_{i32}$ . А начальная фаза выходного напряжения  $\dot{U}_{52}^{(5)}$  в таком случае определится так:  $\varphi_{u52} = \varphi_{10} + \varphi_{i32}$ .

Таким образом, формируются изображения выходных напряжений и тока на комплексной плоскости:  $\dot{U}_{12}^{(5)} = U_{12}^{(5)} e^{j\varphi_{u12}}$ ;  $\dot{U}_{22}^{(5)} = U_{22}^{(5)} e^{j\varphi_{u22}}$ ;  $\dot{I}_{32}^{(5)} = I_{32}^{(5)} e^{j\varphi_{i32}}$ ;  $\dot{U}_{42}^{(5)} = U_{42}^{(5)} e^{j\varphi_{u42}}$ ;  $\dot{U}_{52}^{(5)} = U_{52}^{(5)} e^{j\varphi_{u52}}$ .

В результате выполнения пятого опыта уравнения (1) переписываются так:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{11}^{(5)} &= A\dot{U}_{12}^{(5)} + N\dot{U}_{22}^{(5)} + Q\dot{I}_{32}^{(5)} + R\dot{U}_{42}^{(5)} + V\dot{U}_{52}^{(5)}, \\ \dot{I}_{11}^{(5)} &= C\dot{U}_{12}^{(5)} + E\dot{U}_{22}^{(5)} + H\dot{I}_{32}^{(5)} + J\dot{U}_{42}^{(5)} + L\dot{U}_{52}^{(5)}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

**Шестой опыт** выполняется при отключении всей электрической нагрузки Н1–Н5 и замыканием между собой выходных выводов 4' и 6'. Это достигается в результате размыкания ключей S2–S9, S11 и замыкания ключей S1, S10. Этот опыт характерен отсутствием выходных токов  $\dot{I}_{12}^{(6)}$ ,  $\dot{I}_{22}^{(6)}$ ,  $\dot{I}_{32}^{(6)}$ ,  $\dot{I}_{52}^{(6)}$  и напряжения  $\dot{U}_{42}^{(6)}$ :  $\dot{I}_{12}^{(6)} = \dot{I}_{22}^{(6)} = \dot{I}_{32}^{(6)} = \dot{I}_{52}^{(6)} = 0$ ;  $\dot{U}_{42}^{(6)} = 0$ . Это нашло подтверждение в нулевых показаниях амперметров PA2–PA4, PA6 и вольтметра PV5.

Изображения на комплексной плоскости входные напряжения  $\dot{U}_{11}^{(6)}$  и тока  $\dot{I}_{11}^{(6)}$  в этом опыте определяются точно так же, как и в первом опыте. Модули выходных напряжений  $\dot{U}_{12}^{(6)}$ ,  $\dot{U}_{22}^{(6)}$ ,  $\dot{U}_{32}^{(6)}$ ,  $\dot{U}_{52}^{(6)}$  и тока  $\dot{I}_{42}^{(6)}$  измеряются вольтметрами PV2–PV4, PV6 и амперметром PA5 соответственно.

Для измерения начальной фазы выходного напряжения  $\dot{U}_{12}^{(6)}$  следует, как и в предыдущем опыте, токовую обмотку фазометра Рф2 переключить на входной вывод 1 и обеспечить тем самым регистрацию разности начальных фаз выходного напряжения  $\dot{U}_{12}^{(6)}$  и входного тока  $\dot{I}_{11}^{(6)}$ :  $\varphi_2 = \varphi_{u12} - \varphi_{i11}$ . Искомая начальная фаза определится следующим образом:  $\varphi_{u12} = \varphi_2 + \varphi_{i11}$ .

Аналогично следует поступить и с фазометром Рф4: его токовую обмотку тоже следует переключить на входной вывод 1 для того, чтобы обеспечить регистрацию этим фазометром разности начальных фаз выходного напряжения  $\dot{U}_{22}^{(6)}$  и входного тока  $\dot{I}_{11}^{(6)}$ :  $\varphi_4 = \varphi_{u22} - \varphi_{i11}$ . Начальная фаза выходного напряжения  $\dot{U}_{22}^{(6)}$  тогда определится таким образом:  $\varphi_{u22} = \varphi_4 + \varphi_{i11}$ .

Также следует поступить и с фазометром Рф6: его токовую обмотку тоже следует переключить на входной вывод 1 и обеспечить тем самым измерение разности начальных фаз выходного напряжения  $\dot{U}_{32}^{(6)}$  и входного тока  $\dot{I}_{11}^{(6)}$ :  $\varphi_6 = \varphi_{u32} - \varphi_{i11}$ . А затем можно определить начальную фазу выходного напряжения  $\dot{U}_{32}^{(6)}$ :  $\varphi_{u32} = \varphi_6 + \varphi_{i11}$ .

Если фазометр Рф9 подключен так, как показано на рис. 2, то он способен измерить разность начальных фаз выходных напряжения  $\dot{U}_{32}^{(6)}$  и тока  $\dot{I}_{42}^{(6)}$ :  $\varphi_9 = \varphi_{u32} - \varphi_{i42}$ . Начальная фаза выходного тока  $\dot{I}_{42}^{(6)}$  определится так:  $\varphi_{i42} = \varphi_{u32} - \varphi_9$ .

Переключение токовой обмотки фазометра Рф10 на выходной вывод 4' позволит делать измерение этим фазометром разности начальных фаз выходных напряжения  $\dot{U}_{52}^{(6)}$  и тока  $\dot{I}_{42}^{(6)}$ :  $\varphi_{10} = \varphi_{u52} - \varphi_{i42}$ . А начальная фаза выходного напряжения  $\dot{U}_{52}^{(6)}$  в таком случае определится так:  $\varphi_{u52} = \varphi_{10} + \varphi_{i42}$ . Так формируются изображения выходных напряжений и тока на комплексной плоскости:  $\dot{U}_{12}^{(6)} = U_{12}^{(6)} e^{j\varphi_{u12}}$ ;  $\dot{U}_{22}^{(6)} = U_{22}^{(6)} e^{j\varphi_{u22}}$ ;  $\dot{U}_{32}^{(6)} = U_{32}^{(6)} e^{j\varphi_{u32}}$ ;  $\dot{I}_{42}^{(6)} = I_{42}^{(6)} e^{j\varphi_{i42}}$ ;  $\dot{U}_{52}^{(6)} = U_{52}^{(6)} e^{j\varphi_{u52}}$ .

Уравнения (1) в результате исполнения шестого опыта переписываются следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{11}^{(6)} &= A\dot{U}_{12}^{(6)} + N\dot{U}_{22}^{(6)} + P\dot{U}_{32}^{(6)} + S\dot{I}_{42}^{(6)} + V\dot{U}_{52}^{(6)}, \\ \dot{I}_{11}^{(6)} &= C\dot{U}_{12}^{(6)} + E\dot{U}_{22}^{(6)} + G\dot{U}_{32}^{(6)} + K\dot{I}_{42}^{(6)} + L\dot{U}_{52}^{(6)}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

**Седьмой опыт** тоже предполагает отключение всей электрической нагрузки Н1–Н5 при замыкании выходных выводов 5' и 6' между собой. Это достигается размыканием ключей S2–S10 и замыканием ключей S1, S11. Этот опыт характерен отсутствием выходных токов  $\dot{I}_{12}^{(7)}$ ,  $\dot{I}_{22}^{(7)}$ ,  $\dot{I}_{32}^{(7)}$ ,  $\dot{I}_{42}^{(7)}$  и напряжения  $\dot{U}_{52}^{(7)}$ :  $\dot{I}_{12}^{(7)} = \dot{I}_{22}^{(7)} = \dot{I}_{32}^{(7)} = \dot{I}_{42}^{(7)} = 0$ ;  $\dot{U}_{52}^{(7)} = 0$ . Это нашло подтверждение в нулевых показаниях амперметров РА2 – РА5 и вольтметра РВ6.

Входные напряжение  $\dot{U}_{11}^{(7)}$  и ток  $\dot{I}_{11}^{(7)}$  определяются по рекомендациям, данным при описании первого опыта.

Модули выходных напряжений  $\dot{U}_{12}^{(7)}$ ,  $\dot{U}_{22}^{(7)}$ ,  $\dot{U}_{32}^{(7)}$ ,  $\dot{U}_{42}^{(7)}$  и тока  $\dot{I}_{42}^{(7)}$  регистрируются вольтметрами РВ2–РВ5 и амперметром РА6.

Токовые обмотки фазометров Рф2, Рф4, Рф6 и Рф8 в этом опыте следует переключить на входной вывод 1. Эти действия создают возможность измерения: фазометром Рф2 разности начальных фаз выходного напряжения  $\dot{U}_{12}^{(7)}$  и входного тока  $\dot{I}_{11}^{(7)}$ :  $\varphi_2 = \varphi_{u12} - \varphi_{i11}$ ; фазометром Рф4 разности начальных фаз выходного напряжения  $\dot{U}_{22}^{(7)}$  и входного тока  $\dot{I}_{11}^{(7)}$ :  $\varphi_4 = \varphi_{u22} - \varphi_{i11}$ ; фазометром Рф6 разности начальных фаз выходного напряжения  $\dot{U}_{32}^{(7)}$  и входного тока  $\dot{I}_{11}^{(7)}$ :  $\varphi_6 = \varphi_{u32} - \varphi_{i11}$ ; фазометром Рф8 разности начальных фаз выходного напряжения  $\dot{U}_{42}^{(7)}$  и входного тока  $\dot{I}_{11}^{(7)}$ :  $\varphi_8 = \varphi_{u42} - \varphi_{i11}$ . Теперь можно определить начальные фазы выходных напряжений  $\dot{U}_{12}^{(7)}$  ( $\varphi_{u12} = \varphi_2 + \varphi_{i11}$ ),  $\dot{U}_{22}^{(7)}$  ( $\varphi_{u22} = \varphi_4 + \varphi_{i11}$ ),  $\dot{U}_{32}^{(7)}$  ( $\varphi_{u32} = \varphi_6 + \varphi_{i11}$ ) и  $\dot{U}_{42}^{(7)}$  ( $\varphi_{u42} = \varphi_8 + \varphi_{i11}$ ).

Фазометр Рф11, если он подключен так, как показано на рис. 2, измерит разность начальных фаз выходных напряжения  $\dot{U}_{42}^{(7)}$  и тока  $\dot{I}_{52}^{(7)}$ :  $\varphi_{11} = \varphi_{u42} - \varphi_{i52}$ . Поэтому начальную фазу выходного тока  $\dot{I}_{52}^{(7)}$  в данном случае следует определять так:  $\varphi_{i52} = \varphi_{u42} - \varphi_{11}$ .

Теперь можно заявить о формировании изображений на комплексной плоскости выходных напряжений и тока:  $\dot{U}_{12}^{(7)} = U_{12}^{(7)} e^{j\varphi_{u12}}$ ;  $\dot{U}_{22}^{(7)} = U_{22}^{(7)} e^{j\varphi_{u22}}$ ;  $\dot{U}_{32}^{(7)} = U_{32}^{(7)} e^{j\varphi_{u32}}$ ;  $\dot{U}_{42}^{(7)} = U_{42}^{(7)} e^{j\varphi_{u42}}$ ;  $\dot{I}_{52}^{(7)} = I_{52}^{(7)} e^{j\varphi_{i52}}$ .

По результатам первого опыта уравнения (1) примут вид:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{11}^{(7)} &= A\dot{U}_{12}^{(7)} + N\dot{U}_{22}^{(7)} + P\dot{U}_{32}^{(7)} + R\dot{U}_{42}^{(7)} + W\dot{I}_{52}^{(7)}, \\ \dot{I}_{11}^{(7)} &= C\dot{U}_{12}^{(7)} + E\dot{U}_{22}^{(7)} + G\dot{U}_{32}^{(7)} + J\dot{U}_{42}^{(7)} + M\dot{I}_{52}^{(7)}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

**Восьмой опыт** тоже предполагает отключение всех электрических нагрузок Н1–Н5. Но при этом должны быть замкнуты между собой выходные выводы 1', 2' и 6'. Все это обеспечивается размыканием ключей S2–S6, S9–S11 и замыканием ключей S1, S7 и S8.

Восьмой опыт отличается отсутствием выходных напряжений  $\dot{U}_{12}^{(8)}$  и  $\dot{U}_{22}^{(8)}$ , а также выходных токов  $\dot{I}_{32}^{(8)}$ ,  $\dot{I}_{42}^{(8)}$  и  $\dot{I}_{52}^{(8)}$ :  $\dot{U}_{12}^{(8)} = \dot{U}_{22}^{(8)} = 0$ ;  $\dot{I}_{32}^{(8)} = \dot{I}_{42}^{(8)} = \dot{I}_{52}^{(8)} = 0$ .

Изображения на комплексной плоскости входных напряжения  $\dot{U}_{11}^{(8)}$  и тока  $\dot{I}_{11}^{(8)}$  определяются так же, как и в первом опыте.

Модули выходных токов  $\dot{I}_{12}^{(8)}$ ,  $\dot{I}_{22}^{(8)}$  и напряжений  $\dot{U}_{32}^{(8)}$ ,  $\dot{U}_{42}^{(8)}$ ,  $\dot{U}_{52}^{(8)}$  в этом опыте регистрируют амперметры РА2, РА3 и вольтметры РВ4, РВ5, РВ6.

Фазометр Рф3 при его подключении так, как показано на рис. 2, регистрирует разность начальных фаз входного напряжения  $\dot{U}_{11}^{(8)}$  и выходного тока  $\dot{I}_{12}^{(8)}$ :  $\varphi_2 = \varphi_{u11} - \varphi_{i12}$ . Отсюда определится начальная фаза выходного тока  $\dot{I}_{12}^{(8)}$ :  $\varphi_{i12} = \varphi_{u11} - \varphi_2$ .

Переключение обмотки напряжения фазометра Рф4 на вход анализируемого восьмиполюсника создает возможность регистрации этим фазометром разности начальных фаз входного напряжения  $\dot{U}_{11}^{(8)}$  и выходного тока  $\dot{I}_{22}^{(8)}$  ( $\varphi_4 = \varphi_{u11} - \varphi_{i22}$ ) и, как следствие, определения начальной фазы выходного тока  $\dot{I}_{22}^{(8)}$ :  $\varphi_{i22} = \varphi_{u11} - \varphi_4$ .

Токовые обмотки фазометров Рф6, Рф8 и Рф10 при выполнении восьмого опыта следует переключить на тот вывод, где ток отличен от нуля. Например, на выходной вывод 2'. Тогда эти фазометры смогут измерить следующее: фазометр Рф6 – разность начальных фаз выходных напряжения  $\dot{U}_{32}^{(8)}$  и тока  $\dot{I}_{22}^{(8)}$ :  $\varphi_6 = \varphi_{u32} - \varphi_{i22}$ ; фазометр Рф8 – разность начальных фаз выходных напряжения  $\dot{U}_{42}^{(8)}$  и тока  $\dot{I}_{22}^{(8)}$ :  $\varphi_8 = \varphi_{u42} - \varphi_{i22}$ ; фазометр Рф10 – разность начальных фаз выходных напряжения  $\dot{U}_{52}^{(8)}$  и тока  $\dot{I}_{22}^{(8)}$ :  $\varphi_{10} = \varphi_{u52} - \varphi_{i22}$ . Теперь есть возможность определения: начальной фазы выходного напряжения  $\dot{U}_{32}^{(8)}$ :  $\varphi_{u32} = \varphi_6 + \varphi_{i22}$ ; начальной фазы выходного напряжения  $\dot{U}_{42}^{(8)}$ :  $\varphi_{u42} = \varphi_8 + \varphi_{i22}$ ; начальной фазы выходного напряжения  $\dot{U}_{52}^{(8)}$ :  $\varphi_{u52} = \varphi_{10} + \varphi_{i22}$ .

Так формируются изображения выходных токов и напряжений на комплексной плоскости:  $\dot{I}_{12}^{(8)} = I_{12}^{(8)} e^{j\varphi_{i12}}$ ;  $\dot{I}_{22}^{(8)} = I_{22}^{(8)} e^{j\varphi_{i22}}$ ;  $\dot{U}_{32}^{(8)} = U_{32}^{(8)} e^{j\varphi_{u32}}$ ;  $\dot{U}_{42}^{(8)} = U_{42}^{(8)} e^{j\varphi_{u42}}$ ;  $\dot{U}_{52}^{(8)} = U_{52}^{(8)} e^{j\varphi_{u52}}$ .

Уравнения (1) по результатам восьмого опыта перепишутся так:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{11}^{(8)} &= B\dot{I}_{12}^{(8)} + O\dot{I}_{22}^{(8)} + P\dot{U}_{32}^{(8)} + R\dot{U}_{42}^{(8)} + V\dot{U}_{52}^{(8)}, \\ \dot{I}_{11}^{(8)} &= D\dot{I}_{12}^{(8)} + F\dot{I}_{22}^{(8)} + G\dot{U}_{32}^{(8)} + J\dot{U}_{42}^{(8)} + L\dot{U}_{52}^{(8)}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

**Девятый опыт** тоже выполняется при отключении всех электрических нагрузок Н1–Н5 и замыкании между собой выходных выводов 1', 3' и 6'. Это достигается размыканием ключей S2–S6, S8, S10, S11 и замыканием ключей S1, S7 и S9. Отличительная черта этого опыта заключается в отсутствии выходных напряжений токов  $\dot{U}_{12}^{(9)}$ ,  $\dot{U}_{32}^{(9)}$  и токов  $\dot{I}_{22}^{(9)}$ ,  $\dot{I}_{42}^{(9)}$ ,  $\dot{I}_{52}^{(9)}$ :  $\dot{U}_{12}^{(9)} = \dot{U}_{32}^{(9)} = 0$ ;  $\dot{I}_{22}^{(9)} = \dot{I}_{42}^{(9)} = \dot{I}_{52}^{(9)} = 0$ . Это подтверждается нулевыми показаниями вольтметров PV2, PV4 и амперметров PA3, PA5, PA6.

Изображения входных напряжения  $\dot{U}_{11}^{(9)}$  и тока  $\dot{I}_{11}^{(9)}$  на комплексной плоскости формируются в девятом опыте так же, как и в первом.

Модули выходных токов  $\dot{I}_{12}^{(9)}$  и  $\dot{I}_{32}^{(9)}$  измеряются амперметрами PA2 и PA4, а напряжений  $\dot{U}_{22}^{(9)}$ ,  $\dot{U}_{42}^{(9)}$ ,  $\dot{U}_{52}^{(9)}$  – вольтметрами PV3, PV5 и PV6.

Фазометр Рф3 регистрирует разность начальных фаз входного напряжения  $\dot{U}_{11}^{(9)}$  и выходного тока  $\dot{I}_{12}^{(9)}$ :  $\Phi_3 = \Phi_{u11} - \Phi_{i12}$ . Тогда начальная фаза тока  $\dot{I}_{12}^{(9)}$  определится так:  $\Phi_{i12} = \Phi_{u11} - \Phi_3$ . Если токовую обмотку фазометра Рф4 переключить на выходной вывод 1', то этот фазометр сможет зарегистрировать разность начальных фаз выходных напряжения  $\dot{U}_{22}^{(9)}$  и тока  $\dot{I}_{12}^{(9)}$ :  $\Phi_4 = \Phi_{u22} - \Phi_{i12}$ . Тогда начальная фаза выходного напряжения  $\dot{U}_{22}^{(9)}$  определится следующим образом:  $\Phi_{u22} = \Phi_4 + \Phi_{i12}$ .

Фазометр Рф7 измеряет разность начальных фаз входного напряжения  $\dot{U}_{22}^{(9)}$  и выходного тока  $\dot{I}_{32}^{(9)}$ :  $\Phi_7 = \Phi_{u22} - \Phi_{i32}$ . Поэтому начальную фазу выходного тока  $\dot{I}_{32}^{(9)}$  следует определять так:  $\Phi_{i32} = \Phi_{u22} - \Phi_7$ .

Токовые обмотки фазометров Рф8 и Рф10 следует переключить на выходной вывод 3'. Тогда фазометр Рф8 покажет разность начальных фаз выходных напряжения  $\dot{U}_{42}^{(9)}$  и тока  $\dot{I}_{32}^{(9)}$ :  $\Phi_8 = \Phi_{u42} - \Phi_{i32}$ , а фазометр Рф10 – разность начальных фаз выходных напряжения  $\dot{U}_{52}^{(9)}$  и тока  $\dot{I}_{32}^{(9)}$ :  $\Phi_{10} = \Phi_{u52} - \Phi_{i32}$ . В таком случае начальная фаза выходного напряжения  $\dot{U}_{42}^{(9)}$  определится так:  $\Phi_{u42} = \Phi_8 + \Phi_{i32}$ , а начальная фаза выходного напряжения  $\dot{U}_{52}^{(9)}$  так:  $\Phi_{u52} = \Phi_{10} + \Phi_{i32}$ .

Таким образом, формируются изображения на комплексной плоскости выходных токов и напряжений:  $\dot{I}_{12}^{(9)} = I_{12}^{(9)} e^{j\varphi_{i12}}$ ;  $\dot{U}_{22}^{(9)} = U_{22}^{(9)} e^{j\varphi_{u22}}$ ;  $\dot{I}_{32}^{(9)} = I_{32}^{(9)} e^{j\varphi_{i32}}$ ;  $\dot{U}_{42}^{(9)} = U_{42}^{(9)} e^{j\varphi_{u42}}$ ;  $\dot{U}_{52}^{(9)} = U_{52}^{(9)} e^{j\varphi_{u52}}$ .

В результате выполнения девятого опыта уравнения (1) приобретают вид:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{11}^{(9)} &= B\dot{I}_{12}^{(9)} + N\dot{U}_{22}^{(9)} + Q\dot{I}_{32}^{(9)} + R\dot{U}_{42}^{(9)} + V\dot{U}_{52}^{(9)}, \\ \dot{I}_{11}^{(9)} &= D\dot{I}_{12}^{(9)} + E\dot{U}_{22}^{(9)} + H\dot{I}_{32}^{(9)} + J\dot{U}_{42}^{(9)} + L\dot{U}_{52}^{(9)}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

**Десятый опыт** рекомендуется выполнять тоже при отключении электрических нагрузок Н1–Н5. При этом должны быть замкнуты между собой выходные выводы 1', 4' и 6'. Иными словами, при исполнении этого опыта должны быть разомкнуты ключи S2–S6, S8, S9, S11 и замкнуты ключи S1, S7 и S10.

Десятый опыт характерен отсутствием выходных напряжений токов  $\dot{U}_{12}^{(10)}$ ,  $\dot{U}_{42}^{(10)}$  и токов  $\dot{I}_{22}^{(10)}$ ,  $\dot{I}_{32}^{(10)}$ ,  $\dot{I}_{52}^{(10)}$ :  $\dot{U}_{12}^{(10)} = \dot{U}_{42}^{(10)} = 0$ ;  $\dot{I}_{22}^{(10)} = \dot{I}_{32}^{(10)} = \dot{I}_{52}^{(10)} = 0$ . Это обстоятельство нашло подтверждение в нулевых показаниях вольтметров PV2, PV5 и амперметров PA3, PA4, PA6.

Комплексные значения входных напряжения  $\dot{U}_{11}^{(10)}$  и тока  $\dot{I}_{11}^{(10)}$  здесь определяются точно так же, как и в первом опыте. Модули выходных токов  $\dot{I}_{12}^{(10)}$  и  $\dot{I}_{42}^{(10)}$  регистрируются амперметрами PA2 и PA5, а выходных напряжений  $\dot{U}_{22}^{(10)}$ ,  $\dot{U}_{32}^{(10)}$ ,  $\dot{U}_{52}^{(10)}$  – вольтметрами PV3, PV4 и PV6.

Фазометр Pф3 здесь, как и в предыдущем опыте, измерит разность начальных фаз входного напряжения  $\dot{U}_{11}^{(10)}$  и выходного тока  $\dot{I}_{12}^{(10)}$ :  $\varphi_3 = \varphi_{u11} - \varphi_{i12}$ . А начальная фаза выходного тока  $\dot{I}_{12}^{(10)}$  определится так:  $\varphi_{i12} = \varphi_{u11} - \varphi_3$ . Перед выполнением десятого опыта токовые обмотки фазометров Pф4 и Pф6 следует переключить на выходной вывод 1' для того, чтобы эти фазометры смогли измерить нужные величины: фазометр Pф4 – разность начальных фаз выходных напряжения  $\dot{U}_{22}^{(10)}$  и тока  $\dot{I}_{12}^{(10)}$ :  $\varphi_4 = \varphi_{u22} - \varphi_{i12}$ , а фазометр Pф6 – разность начальных фаз выходных напряжения  $\dot{U}_{32}^{(10)}$  и тока  $\dot{I}_{12}^{(10)}$ :  $\varphi_6 = \varphi_{u32} - \varphi_{i12}$ . Тогда начальная фаза выходного напряжения  $\dot{U}_{22}^{(10)}$  определится так:  $\varphi_{u22} = \varphi_4 + \varphi_{i12}$ ; а начальная фаза выходного напряжения  $\dot{U}_{32}^{(10)}$  так:  $\varphi_{u32} = \varphi_6 + \varphi_{i12}$ .

При подключении фазометра Рф9 так, как показано на рис. 2, он измерит разность начальных фаз выходных напряжения  $\dot{U}_{32}^{(10)}$  и тока  $\dot{I}_{42}^{(10)}$ :  $\varphi_9 = \varphi_{u32} - \varphi_{i42}$ . В таком случае начальная фаза выходного тока  $\dot{I}_{42}^{(10)}$  определится так:  $\varphi_{i42} = \varphi_{u32} - \varphi_9$ .

Если токовую обмотку фазометра Рф10 переключить на выходной вывод 4', то этот фазометр зафиксирует разность начальных фаз выходных напряжения  $\dot{U}_{52}^{(10)}$  и тока  $\dot{I}_{42}^{(10)}$ :  $\varphi_{10} = \varphi_{u52} - \varphi_{i42}$ . Начальная фаза выходного напряжения  $\dot{U}_{52}^{(10)}$  в таком случае определится так:  $\varphi_{u52} = \varphi_{10} + \varphi_{i42}$ . Теперь с полной ответственностью можно заявить о формировании комплексных значений выходных токов и напряжений:  $\dot{I}_{12}^{(10)} = I_{12}^{(10)} e^{j\varphi_{i12}}$ ;  $\dot{U}_{22}^{(10)} = U_{22}^{(10)} e^{j\varphi_{u22}}$ ;  $\dot{U}_{32}^{(10)} = U_{32}^{(10)} e^{j\varphi_{u32}}$ ;  $\dot{I}_{42}^{(10)} = I_{42}^{(10)} e^{j\varphi_{i42}}$ ;  $\dot{U}_{52}^{(10)} = U_{52}^{(10)} e^{j\varphi_{u52}}$ .

Результаты выполнения десятого опыта позволили переписать уравнения (1) следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{11}^{(10)} &= B\dot{I}_{12}^{(10)} + N\dot{U}_{22}^{(10)} + P\dot{U}_{32}^{(10)} + S\dot{I}_{42}^{(10)} + V\dot{U}_{52}^{(10)}, \\ \dot{I}_{11}^{(10)} &= D\dot{I}_{12}^{(10)} + E\dot{U}_{22}^{(10)} + G\dot{U}_{32}^{(10)} + K\dot{I}_{42}^{(10)} + L\dot{U}_{52}^{(10)}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Набор опытов в принципе может быть иным. Главное выполнить поставленную задачу: сформировать 20 (двадцать) уравнений, совместное решение которых позволит определить численные значения коэффициентов уравнений А-формы, описывающих состояние восьми-полюсника с двумя входными и шестью выходными выводами.

Итак, сформировано 20 (двадцать) уравнений (2 – 11), совместное решение которых позволит определить равенства для вычисления искоемых коэффициентов уравнений (1).

Серия опытов, выполняемых для определения этих коэффициентов, тоже может быть иная. Вариантов исполнения таких опытов может быть множество. Здесь предложен лишь один из вариантов таких опытов и результаты одного из вариантов решения экспериментально полученных уравнений. Исследователь вправе подбирать наиболее приемлемый вариант, исходя из внешних условий, минимизируя организационные и технические трудности проведения необходимых экспериментов. Для выполнения этих экспериментов необходимо иметь свободный доступ к исследуемому объекту электроэнергетики, который может быть замещен пассивным шестиполюсником с двумя вход-

ными и шестью выходными выводами и парком соответствующих электроизмерительных приборов.

Предлагаемая серия экспериментов по своей сути представляет один из способов косвенного измерения коэффициентов уравнений А-формы. Но при необходимости сведения о численных значениях коэффициентов А-формы могут оказать существенную помощь в определении численных значений коэффициентов иных форм, тоже описывающих состояние восьмиполюсника с двумя входными и шестью выходными выводами.

Рассмотренные здесь элементы теории восьмиполюсников позволят сделать объективный анализ электротехнического оборудования трехфазного исполнения, а также трехфазных электроэнергетических систем. Развитие теории восьмиполюсников открывает новые возможности такого анализа. Например, объективный анализ распределения электрической энергии по участкам электроэнергетических систем [14].

Разработанные здесь элементы теории восьмиполюсников могут быть образцом для формирования теорий десятиполюсников, двенадцатиполюсников, четырнадцатиполюсников, которыми в условиях пониженного качества электрической энергии могут быть замещены, например, трехфазные линии электропередачи четырехпроводного исполнения [15], трехпроводного исполнения с грозозащитным тросом [16], пятипроводного и шестипроводного (двухцепная ЛЭП) [17] исполнений. Возможна разработка элементов теории многополюсников и иных исполнений [18–20].

### **Библиографический список**

1. Воронов Р.А. Общая теория четырехполюсников и многополюсников. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1951. – 192 с.
2. Зевеке Г.В. Многополюсники. – М.: Изд-во МЭИ, 1971. – 23 с.
3. Попов Н.М., Олин Д.М., Кирилин А.А. Способ передачи сигналов по сельским распределительным сетям 0,38 кВ // Вестник КрасГАУ. – 2017. – № 2. – С. 88–97.
4. Барабанов Е.А., Мальцева И.С., Барабанов И.О. Алгоритм параллельной обработки данных в оптических сетях // Научный вестник НГТУ. – 2004. – Т. 56, № 3. – С. 88–95.
5. Салимоненко Д.А. Применение методов линейного программирования для определения параметров электрических цепей. Ч. 1 // Вестник Башкир. ун-та. – 2015. – Т. 20, № 4. – С. 1155–1163.

6. Куликов А.Л., Лукичева И.А. Определение места повреждения линии электропередачи по мгновенным значениям осциллограмм аварийных событий // Вестник ИГЭУ. – 2016. – Вып. 5. – С. 16–21.

7. Китаев А.В., Агбомассу В.Л., Глухова В.И. Схемы замещения электрических двигателей переменного тока // Электротехнические и компьютерные системы. – 2013. – № 11(87). – С. 59–65.

8. Беликов Ю.С. Многополюсник как модель электрических систем. Ч. 2. – М.: Изд-во НТФ «Энергопрогресс», 2013. – 92 с.

9. Федотов Ю.Б., Нестеров С.А., Мустафа Г.М. Повышение эффективности программ моделирования устройств силовой электроники // *Apriori*. Сер. Естественные и технические науки. – 2015. – № 6. – С. 1–14.

10. Глушенко С.Ф., Коптев А.Н. Разработка и исследование методологии информационного обеспечения технологических систем агрегатно-сборочного производства летательных аппаратов // Известия Самар. НЦ РАН. – 2015. – Т. 17, № 6(2). – С. 491–497.

11. Методика проектирования и перспективная конструкция средств снижения шумов судовых трубопроводов / А.Н. Крюков, Е.В. Шахматов, В.Н. Самсонов, А.Н. Дружин // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. – 2014. – Т. 7, № 3. – С. 67–79.

12. Levitskiy Zh.G., Imanov Zh.Zh., Nurgaliyeva A.D. Quasianalog transformation of Compound Ventilating Network // *European Researcher*. – 2013. – Vol. 40. – № 2–1. – P. 259–267.

13. Бессонов А.В., Лузин С.Ю., Лячек Ю.Т. Определение окрестностей многополюсников // Известия СПбГЭТУ. – 2015. – № 5. – С. 20–23.

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

15. Большанин Г.А. Большанина Л.Ю., Марьясова Е.Г. Распространение электрической энергии пониженного качества по неразветвленной трехфазной четырехпроводной ЛЭП // Вестник Иркутск. гос. техн. ун-та. – 2007. – № 2(30). – С. 65–74.

16. Шевченко М.А., Большанин Г.А. Учет грозозащитного троса при моделировании передачи электрической энергии пониженного качества // Системы. Методы. Технологии. – 2016. – № 3(31). – С. 135–142.

17. Большанин Г.А., Плотников М.П. Распределение электрической энергии вдоль неоднородного участка двухцепной линии электропередачи // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2013. – № 1(29). – С. 14–20.

18. Bolshanin G.A., Bolshanina L.Yu., Maryasova E.G. Indirect Measurement of Aggregate Primary Parameters Of a Two-Wire Transmission Line // Measurement Techniques. – August 2016. – Vol. 59. – Iss. 5. – P. 521–525.

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

20. Большанин Г.А. Многополюсники. – Братск: Изд-во БрГУ, 2017. – 337 с.

### References

1. Voronov R.A. Obshchaia teoriia chetyrekhpoliusnikov i mnogopoliusnikov [The general theory of four-ports and multipoles]. Moscow; Leningrad: Gosenergoizdat, 1951. 192 p.

2. Zeveke G.V. Mnogopoliusniki [Multipolar network]. Moscow: Moskovskii energeticheskii institut, 1971. 23 p.

3. Popov N.M., Olin D.M., Kirilin A.A Sposob peredachi signalov po sel'skim raspredelitel'nyim setiam 0,38 kV [The method of signal transmission over rural distribution networks 0,38 kV]. *Vestnik Krasnoiarского gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2017, no. 2, pp. 88-97.

4. Barabanov E.A., Mal'tseva I.S., Barabanov I.O. Algoritm parallel'noi obrabotki dannykh v opticheskikh setiakh [Algorithm for parallel processing of data in optical networks]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2004, vol. 56, no. 3, pp. 88-95.

5. Salimonenko D.A. Primenenie metodov lineinogo programmirovaniia dlia opredeleniia parametrov elektricheskikh tsepei. Chast' 1 [Application of linear programming methods for determining the parameters of electrical circuits. Part 1]. *Vestnik Bashkirskogo universiteta*, 2015, vol. 20, no. 4, pp. 1155-1163.

6. Kulikov A.L., Lukicheva I.A. Opredelenie mesta povrezhdeniia linii elektroperedachi po mgnovennym znacheniiam ostsillogramm avariinykh sobytii [Determination of the location and damage of the electric line by the instantaneous values of the oscillograms of the emergency events]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*, 2016, iss. 5, pp. 16-21.

7. Kitaev A.V., Agbomassu V.L., Glukhova V.I. Skhemy zameshcheniia elektricheskikh dvigatelei peremennogo toka [Schemes of replacement of electric motors of alternating current]. *Elektrotekhnicheskie i komp'iuternye sistemy*, 2013, no. 11(87), pp. 59-65.

8. Belikov Iu.S. *Mnogopoliusnik kak model' elektricheskikh sistem. Chast' 2* [Multipole network as a model of electrical systems. Part 2]. Moscow: NTF "Energoprogress", 2013. 92 p.

9. Fedotov Iu.B., Nesterov S.A., Mustafa G.M. *Povyshenie effektivnosti programm modelirovaniia ustroystv silovoi elektroniki* [Increasing the effectiveness of simulation programs for power electronics devices]. *Apriori. Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2015, no. 6, pp. 1-14.

10. Tlustenko S.F., Koptev A.N. *Razrabotka i issledovanie metodologii informatsionnogo obespecheniia tekhnologicheskikh sistem agregatno-sborochnogo proizvodstva letatel'nykh apparatov* [Development and research of methodology of information support of technological systems of aggregate-assembly production of aircrafts]. *Izvestiia Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2015, vol. 17, no. 6(2), pp. 491-497.

11. Kriukov A.N., Shakhmatov E.V., Samsonov V.N., Druzhin A.N. *Metodika proektirovaniia i perspektivnaia konstruktsiia sredstv snizheniia shumov sudovykh truboprovodov* [Design methodology and perspective design of noise reduction means for ship pipelines]. *Fundamental'naiia i prikladnaia gidrofizika*, 2014, vol. 7, no. 3, pp. 67-79.

12. Levitskiy Zh.G., Imanov Zh.Zh., Nurgaliyeva A.D. *Quasianalog transformation of Compound Ventilating Network*. *European Researcher*, 2013, vol. 40, no. 2-1, pp. 259-267.

13. Bessonov A.V., Luzin S.Iu., Liachek Iu.T. *Opredelenie okrestnostei mnogopoliusnikov* [Definition of neighborhoods of multipoles]. *Izvestiia Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo elektrotekhnicheskogo universiteta*, 2015, no. 5, pp. 20-23.

14. Bol'shanin G.A. *Peredacha elektricheskoi energii po LEP odno-, dvukh- i trekhprovodnogo ispolnenii* [Transmission of electrical energy through transmission lines of single-, double- and three-wire versions]. Bratsk: Bratskii gosudarstvennyi universitet, 2016. 313 p.

15. Bol'shanin G.A., Bol'shanina L.Iu., Mar'iasova E.G. *Rasprostranenie elektricheskoi energii ponizhennogo kachestva po nerazvetvlennoi trekhfaznoi chetyrekhprovodnoi LEP* [Distribution of low-quality electric energy through an unbranched three-phase four-wire power line]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2007, no. 2(30), pp. 65-74.

16. Shevchenko M.A., Bol'shanin G.A. *Uchet grozozashchitnogo trosa pri modelirovanii peredachi elektricheskoi energii ponizhennogo kachestva*

[Accounting for lightning protection cable in the simulation of the transmission of electrical energy of reduced quality]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*, 2016, no. 3(31), pp. 135-142.

17. Bol'shanin G.A., Plotnikov M.P. Raspredelenie elektricheskoi energii vdol' neodnorodnogo uchastka dvukhtsepoi linii elektroperedachi [Distribution of electric energy along an inhomogeneous section of a two-circuit power transmission line]. *Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy upravleniia*, 2013, no. 1(29), pp. 14-20.

18. Bol'shanin G.A., Bol'shanina L.Yu., Maryasova E.G. Indirect Measurement of Aggregate Primary Parameters Of a Two-Wire Transmission Line. *Measurement Techniques*, August 2016, vol. 59, iss. 5, pp. 521-525.

19. Bol'shanin G.A., Bol'shanina L.Iu., Mar'iasova E.G. Kosvennoe izmerenie ukрупnennykh pervichnykh parametrov dvukhprovodnoi linii elektroperedachi [Indirect measurement of the Aggregate primary parameters of a two-wire power transmission line]. *Izmeritel'naia tekhnika*, 2016, no. 5, pp. 50-52.

20. Bol'shanin G.A. Mnogopoliusniki [Multipolar network]. Bratsk: Bratskii gosudarstvennyi universitet, 2017. 337 p.

### **Сведения об авторе**

**Большанин Георгий Анатольевич** (Братск, Россия) – кандидат технических наук, доцент Братского государственного университета (665709, Братск, Иркутская обл., ул. Макаренко, 40, e-mail: bolshaning@mail.ru).

### **About the author**

**Bolshandin Georgiy Anatolevich** (Bratsk, Russian Federation) is a Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor Bratsk State University (665709, Bratsk, Irkutsk region, 40, Makarenko str., e-mail: bolshaning@mail.ru).

Получено 09.07.2018