

5. Морозова О.Г. и др. Мониторинг качества воды водоема-охладителя Березовской ГРЭС-1 // Изв. вузов. Химия и химическая технология. – 2002. – Т. 45, вып. 2. – С. 144–147.
2. Alimov A.F. Jelementy teorii funkcionirovanija vodnyh jekosistem.– SPb.: Nauka, 2000. – 147 s.
3. Nalimov V.V. Teorija jeksperimenta. – M.: Nauka, 1971. – 208 s.
4. Pen R.Z. Planirovanie jeksperimenta v Statgraphics. – Krasnojarsk: Klaretianum, 2003. – 246 s.
5. Morozova O.G. i dr. Monitoring kachestva vody vodoema-ohladiatelja Berезovskoj GRJeS-1 // Izv. vuzov. Himija i himicheskaja tehnologija. – 2002. – Т. 45, вып. 2. – С. 144–147.

Literatura

1. Morozova O.G., Pen R.Z., Repjah S.M. Osobennosti formirovanija gidrohimicheskogo rezhima vodo-ema-ohladiatelja Berезovskoj GRJeS-1. – Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2001. – 214 s.



УДК 621.398

*А.А. Кирилин, Н.М. Попов,
Д.М. Олин*

ИЗМЕНЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ПРИ ПЕРЕДАЧЕ СИГНАЛОВ ПО СИЛОВОЙ СЕТИ 0,38 кВ

*А.А. Kirilin, N.M. Popov,
M.D. Olin*

THE CHANGE IN VOLTAGE OF ZERO SEQUENCE DURING THE SIGNALING ON POWER NETWORK 0.38 kV

Кирилин А.А. – ассист. каф. электроснабжения Костромской государственной сельскохозяйственной академии, Костромская обл., Костромской р-н, п. Караваево. E-mail: A.A.Kirilin@yandex.ru

Попов Н.М. – д-р техн. наук, проф. каф. электроснабжения Костромской государственной сельскохозяйственной академии, Костромская обл., Костромской р-н, п. Караваево. E-mail: A.A.Kirilin@yandex.ru

Олин Д.М. – канд. техн. наук, доц., зав. каф. электроснабжения Костромской государственной сельскохозяйственной академии, Костромская обл., Костромской р-н, п. Караваево. E-mail: A.A.Kirilin@yandex.ru

Kirilin A.A. – Asst, Chair of Power Supply, Kostroma State Agricultural Academy, Kostroma Region Kostroma District, V. Karavaevo. E-mail: A.A.Kirilin@yandex.ru

Popov N.M. – Dr. Techn. Sci., Prof., Chair of Power Supply, Kostroma State Agricultural Academy, Kostroma Region, Kostroma District, V. Karavaevo. E-mail: A.A.Kirilin@yandex.ru

Olin D.M. – Cand. Techn. Sci., Assoc. Prof., Head, Chair of Power Supply, Kostroma State Agricultural Academy, Kostroma Region, Kostroma District, V. Karavaevo E-mail: A.A.Kirilin@yandex.ru

Расположение сельскохозяйственных предприятий в районах с низко развитой коммуникационной сетью делает перспективной раз-

работку способов электросвязи по силовым проводам, непосредственно питающим электроустановки. Поэтому на кафедре

«Электроснабжение» Костромской ГСХА разработан способ управления электропотребителями по силовой сети: в начале линии в расщепку нулевого провода включается вторичная обмотка однофазного трансформатора, на первичную обмотку которого подается фазное или линейное напряжение. В конце линии устанавливается реагирующий орган, который при заданном изменении фазного напряжения выполняет запрограммированные действия, например подает сигнал включения или отключения. Передача сигналов таким способом основана на изменении потенциала нулевого провода, также изменяемого при подключении несимметричной однофазной нагрузки. С целью изучения влияния несимметричной однофазной нагрузки на сигналы управления, передаваемые по силовой сети, проведено теоретическое исследование на примере системы электроснабжения трех скважин. Математическая модель системы составлена с использованием метода фазных координат, результаты обрабатывались в программе STATGRAPHICS Plus. В статье представлена техническая реализация способа управления электропотребителями по силовой сети; с применением метода фазных координат составлена математическая модель системы электроснабжения трех скважин, в которой сигналы управления передаются по силовой сети посредством изменения напряжения нулевой последовательности; обоснован выбор напряжения, подаваемого на первичную обмотку трансформатора, используемого для передачи сигналов по силовой сети при подключении к ней несимметричной однофазной нагрузки; а также доказана возможность изменения действующего значения тока в нулевом проводе и угла тока в нулевом проводе независимо друг от друга.

Ключевые слова: однофазный трансформатор, нулевая последовательность, изменение фазных напряжений, статистическая обработка результатов, метод симметричных составляющих.

The location of agricultural enterprises in areas with less developed communication network makes it promising to develop methods of telecommunication by power wires directly feeding electrical instal-

lations. Therefore the Department of Electricity Supply of Kostroma State Agricultural Academy has developed the method for controlling electrical consumers in the power network, by which at the beginning of the line a secondary winding of a single-phase transformer is inserted into the gap of neutral wire, the primary winding of the transformer is fed with the phase or line voltage. At the end of the line reacting body which at the set change of phase tension carries out the programmed actions is established, for example, it gives the signal of inclusion or shutdown. Signaling is in such a way based on the change of potential of a zero wire, also changeable at the connection of asymmetrical single-phase loading. For the purpose of studying the influence of asymmetrical single-phase load of signals the control transferred on a power network theoretical research on the example of system of power supply of three wells was conducted. Mathematical model of system was made with the use of the method of phase coordinates, the results were processed in the STATGRAPHICS Plus program. Technical realization of the way of management of consumers of electricity on a power network was presented in the study with application of the method of phase coordinates mathematical model of the system of power supply of three wells in which signals control were transferred on a power network by means of the change of tension of zero sequence was made; the choice of tension given on primary winding of the transformer used for signaling on a power network at connection with symmetrical single-phase loading was reasonable; and also the possibility of change of the operating value of current in zero wire and current corner in zero wire independently from each other was proved.

Keywords: single-phase transformer, zero-sequence, phase voltage variation, statistical processing of results, symmetric components method.

Введение. Разработан способ передачи сигналов по силовым проводам [1], по которому для передачи сигналов искусственно изменяется потенциал нулевого провода, что вызывает изменение фазных напряжений [2]. Такое изменение улавливает реагирующий орган (РО) в конце линии и производит операции включения и отключения потребителей. Однако фазные напряжения изменяются также при работе подключенной к линии несимметрично распреде-

ленной по фазам однофазной нагрузки, что может вызвать ложные срабатывания РО. Поэтому требуется изучить влияние несимметрии, созданной при работе однофазной нагрузки, на передачу сигналов по силовой сети.

В качестве примера рассмотрена система электроснабжения трех скважин, на каждой скважине присутствует трехфазная нагрузка – погружные электродвигатели и однофазная нагрузка – сигнальная арматура и электронагреватели (рис. 1).

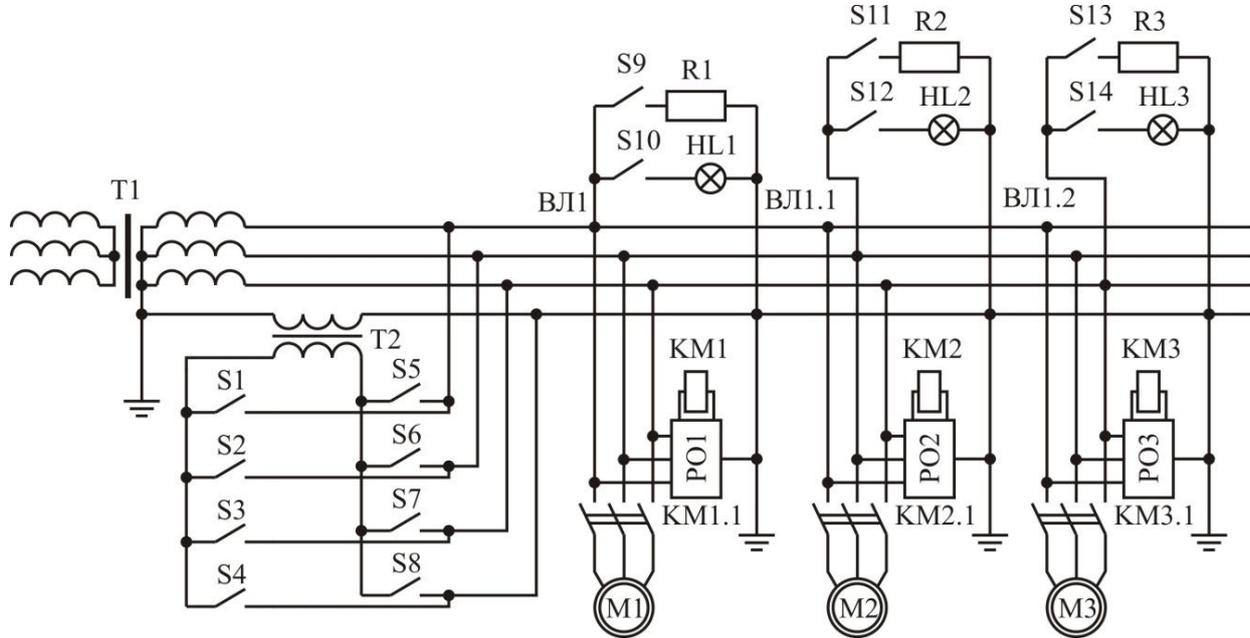


Рис. 1. Система электроснабжения трех скважин

Трансформатор T2 (см. рис. 1) предназначен для передачи сигналов, и на его первичную обмотку выключателями S1–S8 можно подать любые фазные или линейные напряжения. При этом на вторичной обмотке трансформатора T2 наводится ЭДС определенной величины с определенным сдвигом фазы, что приведет к срабатыванию настроенного на такое изменение РО, который произведет заданные действия.

Цель исследования: изучить влияние изменений напряжения, возникающих в результате работы не симметрично распределенной однофазной нагрузки, на сигналы управления, передаваемые по силовой сети 0,38 кВ путем изменения напряжения нулевой последовательности.

Задачи исследования: составить математическую модель системы электроснабжения трех скважин с использованием метода фазных координат, включающую устройство для пере-

дачи сигналов; выбрать факторы, влияющие на изменение исследуемой величины, провести исследование.

Методика исследования. Данная система имеет трансформаторные связи, поэтому ее расчет с применением метода симметричных составляющих затруднен. Но возможно применение метода фазных координат, основные положения которого сформулированы в работе [3], в [4, 5] рассмотрены вопросы моделирования трехфазных трансформаторов, линий электропередач и нагрузок в сетях 0,38 кВ, в работе [2] рассмотрена математическая модель трансформатора, включенного вторичной обмоткой в рассечку нулевого провода, когда на первичную обмотку подается фазное или линейное напряжение.

Математическую модель системы (см. рис. 1) представим как совокупность многополюсников, соединенных каскадно (рис. 2).

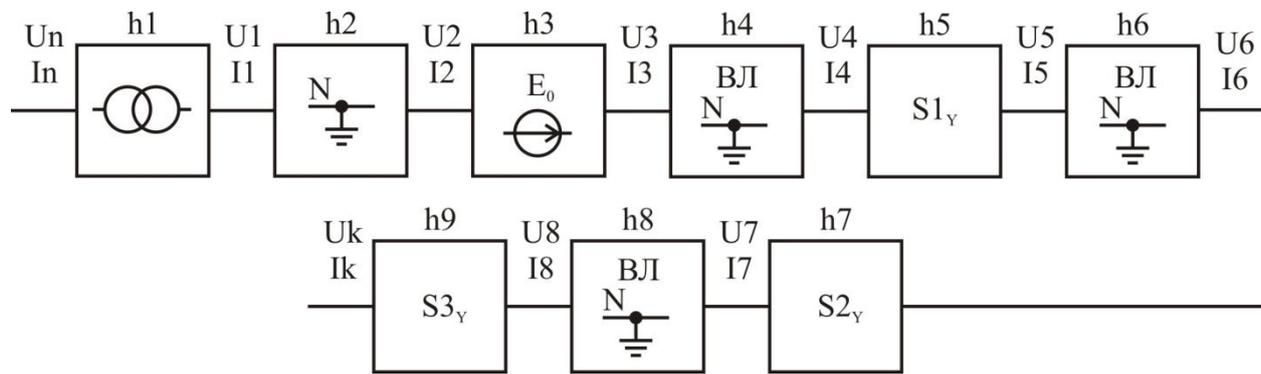


Рис. 2. Схема замещения системы электроснабжения трех скважин

На рисунке 2: h1 – модель силового трансформатора; h2 – модель заземления нулевого провода; h3 – модель трансформатора, включенного в нулевой провод; h4, h6, h8 – модель трехфазной четырехпроводной линии, имеющей повторное заземление нулевого провода; h5, h7, h9 – модель трехфазной нагрузки, соединенной по схеме «звезда»; $U_n, U_1, U_2, U_3, U_4, U_5, U_6, U_7, U_8, U_k$ – матрицы напряжений между входами или выходами многополюсников и базисной точкой размерностью 4×1 ; $I_n, I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6, I_7, I_8, I_k$ – матрицы токов на входе или выходе многополюсников, размерностью 4×1 .

Для расчетов принято расстояние между скважинами в соответствии с радиусом их влияния 150 м [6]; на каждой скважине присутствует однофазная нагрузка мощностью 0–2 кВт. Источником питания служит силовой трансформатор ТМ-160/10 10/0,4 кВ, воздушная линия с PEN проводником и заземлением 30 Ом [7], разделенная на участки (ВЛ1, ВЛ1.1, ВЛ1.2), отходящая от подстанции, выполнена проводом марки СИП 2А 3×35+54,6.

Исследуемой величиной является напряжение нулевой последовательности (ННП) вблизи скважин. По второму закону Кирхгофа ННП \underline{U}_0 можно найти, рассмотрев контур токов нулевой последовательности:

$$\underline{U}_0 = -\underline{I}_0 \cdot \underline{Z}_0,$$

где \underline{I}_0 – ток нулевой последовательности (ТНП); \underline{Z}_0 – сопротивление нулевой последовательности.

При неизменном сопротивлении \underline{Z}_0 напряжение \underline{U}_0 будет зависеть только от ТНП. Поэтому в качестве факторов выбраны действующее значение ТНП и сдвиг по фазе φ_0 тока \underline{I}_0 относительно оси ординат.

$$U_0 = f(I_0, \varphi_0).$$

Ток в нулевом проводе равен утроенному ТНП, тогда ННП

$$U_0 = f\left(\frac{|I_N|}{3}, \varphi_0\right).$$

Согласно первому закону Кирхгофа, ток в нулевом проводе равен сумме векторов фазных токов:

$$\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C.$$

Изменение токов $\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$ приведет к изменению действующего значения тока \underline{I}_N , а также сдвига фазы φ_0 , тогда

$$|\underline{I}_N| = f(\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C); \varphi_0 = f(\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C).$$

Величины $|\underline{I}_N|, \varphi_0$ являются функциями переменных $\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$, поэтому требуется доказать возможность независимого изменения выбранных факторов.

Рассмотрим систему фазных токов разных по величине $\underline{I}'_A, \underline{I}'_B, \underline{I}'_C$, смещенных друг относительно друга на угол 120° . Сумма этих токов будет равна току в нулевом проводе:

$$\underline{I}'_A + \underline{I}'_B + \underline{I}'_C = \underline{I}_N.$$

Пусть токи в двух фазах будут отличаться в некоторое количество раз «x» и «y» от тока в фазе «А», тогда можно записать:

$$\underline{I}'_A + \underline{I}'_A \cdot a^2 \cdot x + \underline{I}'_A \cdot a \cdot y = \underline{I}_N,$$

где a – фазный множитель, умножение на который соответствует повороту вектора на 120° против часовой стрелки.

Выразив y из уравнения, получим:

$$y = \frac{I_N}{I'_A \cdot a} - \frac{1}{a} - a \cdot x. \quad (1)$$

В уравнении (1) изменяя значение переменной x можно найти такое значение y , модуль которого будет равен действительной части. Например, для тока I_N , действующее значение которого равно 5 А, сдвиг по фазе 50° , было найдено значение коэффициента y , при котором его модуль будет равен действительной части $y = 0,896$, при этом $x = 0,45$. Значит в проводе фазы «А» $I'_A = 2 \cdot |I_N|$, ток фазы «В» будет равен $I'_B = 0,45 \cdot a^2 \cdot I'_A$, ток фазы «С» – $I'_C = 0,896 \cdot a \cdot I'_A$, ток в нулевом проводе будет равен I_N . Таким образом, можно подобрать значение коэффициентов x, y для любого тока в нулевом проводе. Зная фазный ток и фазное напряжение, по закону Ома можно рассчитать значения сопротивлений, необходимых для протекания токов I'_A, I'_B, I'_C . Если переменная y приняла отрицательное значение, значение переменной I'_A следует увеличивать до достижения y положительного значения. Таким образом, выбранные факторы являются независимо изменяемыми.

Для исследования выбраны значения 0; 0,5; 1; 1,5; 2 кВт мощности однофазной нагрузки, количество возможных комбинаций для трех скважин $N = 125$. Это обеспечит варьирование фактора I_0 на уровнях: 0,00; 0,76; 1,31; 1,52; 2,27; 2,59; 3,03 А; фактора φ_0 – 360, 330, 300, 270, 240, 210, 180, 150, 120, 90, 60, 30° .

Рассмотрен случай включения нагрузки на одной скважине на фазу «А», на другой – на фазу «В», на третьей – на фазу «С». Уравнение, описывающее изменение зависимой величины

от выбранных факторов, в общем виде можно записать так:

$$dU_{I_0} = b_1 + b_2 \cdot (\varphi_0 + b_3)^2 + b_4 \cdot I_0. \quad (2)$$

При изменении положения выключателей S1–S8 изменяется матрица инцидентий модели однофазного трансформатора, включенного вторичной обмоткой в рассечку нулевого провода, что было описано в [2].

Результаты исследования. Результаты расчетов обрабатывались с помощью специализированного пакета по статистическому анализу и обработке данных STATGRAPHICS Plus для Windows.

В результате пакетного анализа рассчитанных изменений напряжения нулевой последовательности вблизи скважины 1 при подаче напряжения « U_A » на первичную обмотку трансформатора определены коэффициенты уравнения (2):

$$dU_{I_0} = -17.4734 + 0.000243 \cdot (\varphi_0 - 3.69)^2 + 4.86 \cdot I_0.$$

Коэффициент детерминации данной модели $R^2 = 89\%$, скорректированный коэффициент детерминации $R^2_{ск} = 89\%$.

На рисунке 3 представлена поверхность отклика при подаче напряжения U_A на первичную обмотку трансформатора для первой скважины.

Из поверхности на рисунке 3 видно, что максимальное изменение абсолютного значения напряжения нулевой последовательности достигается при угле сдвига фазы тока нулевой последовательности 0° . Аналогично были составлены уравнения для других возможных напряжений, поданных на первичную обмотку трансформатора Т2 (см. рис. 1), коэффициенты представлены в таблице.

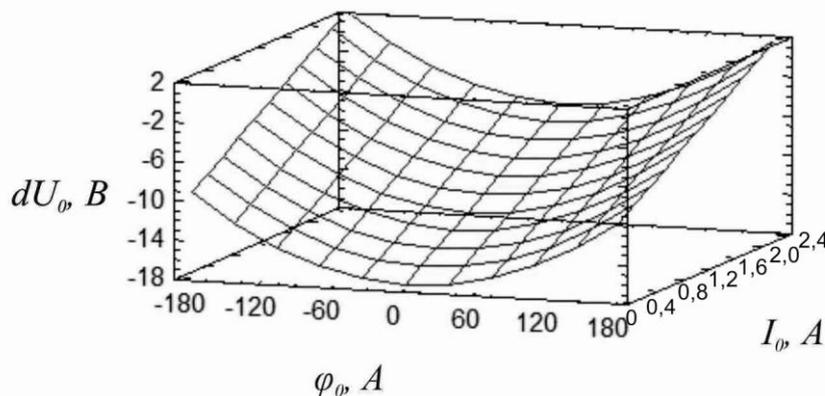


Рис. 3. Поверхность отклика при подаче напряжения U_A

Коэффициенты уравнения регрессии (2)

| Матрица инцидентов (напряжение) | b_1 | b_2 | b_3 | b_4 | $R^2, \%$ | $R^2_{ск}, \%$ |
|------------------------------------|--------|----------|--------|-------|-----------|----------------|
| M1 (U_A) | -17,47 | 0,00024 | -3,69 | 4,86 | 89 | 89 |
| M2 ($-U_A$) | -16,16 | 0,00028 | -199,5 | 0,49 | 88 | 88 |
| M3 (U_B) | -14,67 | 0,00041 | -118,6 | 0,009 | 83 | 82 |
| M4 ($-U_B$) | -15,29 | 0,000016 | -289,2 | 7,42 | 98 | 97 |
| M5 (U_C) | -17,15 | 0,0002 | -240 | 4,82 | 88 | 88 |
| M6 ($-U_C$) | -15,94 | 0,00037 | -58,18 | 1,74 | 88 | 88 |
| M7 (U_{AB}) | -27,64 | 0,000098 | 30 | 7,11 | 96 | 96 |
| M8 ($-U_{AB}$) | -25,69 | 0,0004 | -152,8 | 0,58 | 83 | 83 |
| M9 (U_{BC}) | -25,79 | 0,00039 | -83,1 | 0,67 | 84 | 84 |
| M10 ($-U_{BC}$) | -26,23 | 0,00002 | 100 | 6,9 | 80 | 80 |
| M11 (U_{CA}) | -27,9 | 0,00034 | -210 | 3,36 | 88 | 88 |
| M12 ($-U_{CA}$) | -27,9 | 0,00033 | -30 | 3,58 | 89 | 89 |

Коэффициент детерминации (доля дисперсии исследуемой переменной, объясняемая рассматриваемой моделью) во всех случаях более 75 %, значит, все модели работоспособны и их можно использовать для получения новых значений исследуемой переменной.

На основании анализа поверхностей отклика для уравнений регрессии сделан вывод:

– при сдвиге фазы тока нулевой последовательности 0° относительно оси ординат максимальное изменение напряжения нулевой последовательности происходило при подаче напряжения « U_A » на первичную обмотку трансформатора, при 180° – « $-U_A$ », при 120° – « U_B », при 300° – « $-U_B$ », при 240° – « U_C », при 60° – « $-U_C$ », при 330° – « U_{AB} », при 150° – « $-U_{AB}$ », при 90° – « U_{BC} », при -90° – « $-U_{BC}$ », при 30° – « U_{CA} », при 210° – « $-U_{CA}$ ».

Значит, подавая определенное напряжение на первичную обмотку трансформатора, можно добиться максимального изменения напряжения нулевой последовательности вблизи скважин при любой несимметричной нагрузке.

Зная величину, на которую изменится напряжение нулевой последовательности при подаче напряжения на первичную обмотку трансформатора, а также фазные напряжения до этого, можно по известным формулам рассчитать изменение напряжения после включения:

$$\begin{aligned} \underline{U}_A &= \underline{U}_{A1} + \underline{U}_{A2} + \underline{U}_{A0} ; \\ \underline{U}_B &= \underline{U}_{B1} + \underline{U}_{B2} + \underline{U}_{B0} ; \end{aligned}$$

$$\underline{U}_C = \underline{U}_{C1} + \underline{U}_{C2} + \underline{U}_{C0},$$

где \underline{U}_{A1} , \underline{U}_{A2} , \underline{U}_{A0} – напряжения фазы «А» прямой, обратной и нулевой последовательностей; \underline{U}_{B1} , \underline{U}_{B2} , \underline{U}_{B0} – напряжения фазы «В» прямой, обратной и нулевой последовательностей; \underline{U}_{C1} , \underline{U}_{C2} , \underline{U}_{C0} – напряжения фазы «С» прямой, обратной и нулевой последовательностей.

С учетом дополнительной ЭДС ($\underline{E}_{дон}$), равной напряжению вторичной обмотки трансформатора:

$$\begin{aligned} \underline{U}_A &= \underline{U}_{A1} + \underline{U}_{A2} + \underline{U}_{A0} - \underline{E}_{дон} \cdot e^{-j\psi} ; \\ \underline{U}_B &= \underline{U}_{A1} \cdot a^2 + \underline{U}_{A2} \cdot a + \underline{U}_{A0} - \underline{E}_{дон} \cdot e^{-j\psi} ; \\ \underline{U}_C &= \underline{U}_{A1} \cdot a + \underline{U}_{A2} \cdot a^2 + \underline{U}_{A0} - \underline{E}_{дон} \cdot e^{-j\psi} , \end{aligned}$$

где ψ – сдвиг по фазе $\underline{E}_{дон}$.

Выводы:

– разработана техническая реализация способа управления электропотребителями по силовой сети;

– доказано, что можно изменять действующее значение тока в нулевом проводе и угол тока в нулевом проводе независимо друг от друга;

– с применением метода фазных координат составлена математическая модель системы электроснабжения трех скважин, в которой сигналы управления передаются по силовой сети посредством изменения напряжения нулевой последовательности;

– обоснован выбор напряжения, подаваемого на первичную обмотку трансформатора, используемого для передачи сигналов по силовой

сети при подключении к ней несимметричной однофазной нагрузки.

Литература

1. Пат. № 2601875 Российская Федерация, МПК H02J13/00. Способ управления электропотребителями по силовой сети / Попов Н.М., Кирилин А.А., Олин Д.М.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Костромская государственная сельскохозяйственная академия», № 2015107405; заявл. 03.03.2015, опубл. 17.10.2016, Бюл. № 31.
2. Кирилин А.А., Попов Н.М., Олин Д.М. Способ передачи сигналов по сельским распределительным сетям 0,38 кВ // Вестн. КрасГАУ. – 2017. – № 2 (125). – С. 88–97.
3. Мельников Н.А. Матричный метод анализа электрических цепей. – М.: Госэнергоиздат, 1972. – 231 с.
4. Солдатов В.А., Чебесов Е.А., Вылчу И.И. Аварийные режимы сетей 0,38 кВ с однобаковым потребителем трансформатором // Изв. Горского гос. аграр. ун-та. – 2016. – Т. 53, № 2. – С. 143–146.
5. Попов Н.М. Повышение надежности электроснабжения сельского хозяйства путем совершенствования релейных защит от аварийных режимов в сетях 0,38...35 кВ: дис. ... д-ра техн. наук. – Кострома, 2006. – 370 с.
6. Компания по водообеспечению «БУРВОД» [Электрон. ресурс]. – URL: <http://burvod.ua/vopros-otvet.html> (дата обращения: 05.06.2017).
7. Правила устройства электроустановок: все действующие разделы шестого и седьмого изданий с изменениями и дополнениями по состоянию на 1 июля 2010 г. – М.: КНОРУС, 2010. — 488 с.

Literatura

1. Pat. № 2601875 Rossijskaja Federacija, MPK H02J13/00. Sposob upravljenja jelektropotrebiteľjami po silovoj seti / Popov N.M., Kirilin A.A., Olin D.M.; zajavitel' i patentoobladatel' Federal'noe gosudarstvennoe bjudzhetnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovanija «Kostromskaja gosudarstvennaja sel'skohozjaj-stvennaja akademija», № 2015107405; zajavl. 03.03.2015, opubl. 17.10.2016, Bjul. № 31.
2. Kirilin A.A., Popov N.M., Olin D.M. Sposob peredachi signalov po sel'skim raspredelitel'nym setjam 0,38 kV // Vestn. KrasGAU. – 2017. – № 2 (125). – S. 88–97.
3. Mel'nikov N.A. Matrichnyj metod analiza jelektricheskih cepej. – M.: Gosjenergoizdat, 1972. – 231 s.
4. Soldatov V.A., Chebesov E.A., Vylchu I.I. Avarijnye rezhimy setej 0,38 kv s odnobakovym potrebitel'skim transformatorom // Izv. Gorskogo gos. agrar. un-ta. – 2016. – T. 53, № 2. – S. 143–146.
5. Popov N.M. Povyshenie nadezhnosti jelektrosnabzhenija sel'skogo hozjajstva putem sovershenstvo-vanija relejnyh zashhit ot avarijnyh rezhimov v setjah 0,38...35 kV: dis. ... d-ra tehn. nauk. – Kost-roma, 2006. – 370 s.
6. Kompanija po vodoobespecheniju «BURVOD» [Elektron. resurs]. – URL: <http://burvod.ua/vopros-otvet.html> (data obrashhenija: 05.06.2017).
7. Pravila ustrojstva jelektroustanovok: vse dejstvujushhie razdely shestogo i sed'mogo izdanij s izmenenijami i dopolnenijami po sostojaniju na 1 ijulja 2010 g. – M.: KNORUS, 2010. — 488 s.