

ИДЕНТИФИКАЦИЯ НЕКОНТРОЛИРУЕМЫХ КОМПЛЕКСНЫХ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ ПО ДАННЫМ АСКУЭ

Такырбашев Бейшеналы Касымалиевич, к.т.н., доцент, Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, Кыргызстан, 720044, г. Бишкек, пр. Ч.Айтматова 66, e-mail: b.takyrbashev@gmail.com.

Койбагаров Таалайбек Джергалбекович, аспирант, Национальная академия наук Кыргызской Республики, г.Бишкек, e-mail: koibagarov@bk.ru.

Жаныбаев Тилебалды Оторбекович, зам.ген.директора, ОАО «Северэлектро», Кыргызская Республика, Чуйская обл., Аламудунский р-н, с.Лебединовка, ул.Чкалова, e-mail: zhanybaev1979@mail.ru

Оморов Туратбек Турсунбекович, д.т.н., член-корреспондент Национальной академии наук Кыргызской Республики, г. Бишкек, пр. Чуй, 66а, e-mail: omorovtt@mail.ru. ORCIDID 0000- 0002- 5902- 0220

Аннотация. Дальнейшее совершенствования современных автоматизированных систем контроля и учета электроэнергии (АСКУЭ), внедряемых для автоматизации распределительных электрических сетей (РЭС) напряжением 0,4 кВ обуславливает необходимости разработки новых методов, математических моделей и соответствующих цифровых технологий. В статье излагаются вопросы, связанные с применением одного из возможных методов идентификации математической модели несимметричной РЭС и

разработанного на его основе программного комплекса. При этом модель распределительной сети представляется в виде системы комплексных токов и напряжений, описывающих электрическое состояние трехфазной сети. При этом в качестве исходных данных используется первичная информация, полученная со счетчиков электроэнергии входящих в состав АСКУЭ. Приведены результаты расчета комплексных токов и напряжений на нагрузках и межабонентских участках магистральной линии РЭС заданной структуры, не все параметры которой измеряются и контролируются.

Ключевые слова: распределительная сеть, модель сети, программный комплекс, расчет комплексных токов и напряжений.

DISTRIBUTIVE ELECTRIC NETWORK ACCORDING TO ASKUE

Takyrbashev Beishenaly Kasymaliebich, Ph.D., Senior Lecturer, Kyrgyz State Technical University I. Razzakova, Kyrgyzstan, 720044, Bishkek, 66 Aitmatova Ave., e-mail: b.takyrbashev@gmail.com.

Koibagarov Taalaibek Dzhyrgalbekovich, Doctoral Candidate, National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek. koibagarov@bk.ru.

Zhanybaev Tilebaldy Otorbekovich, Deputy General Director, OJSC Severelectro, Kyrgyz Republic, Chuy Oblast, Alamudun Region, Lebedinovka village, Chkalova St., e-mail: zhanybaev1979@mail.ru

Omorov Turatbek Tursunbekovich, Doctor of Technical Sciences, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek city, Chui Ave., 66a, e-mail: omorovtt@mail.ru. ORCIDID 0000- 0002-5902-0220

Annotation. Further perfection of the modern automated monitoring systems and the electric power account (ASKUE), distributive electric networks introduced for automation (DEN) voltage 0,4 kV causes necessities of working out of new methods, mathematical models and corresponding digital technologies. In article it is stated the questions connected with application of one of possible methods of identification of mathematical model asymmetrical DEN and a program complex developed on its basis. Thus the model distributive electric networks is represented in the form of system of complex currents and voltages describing an electric condition of a three-phase network. This as initial data the primary information received with counters of the electric power a part ASKUE is used. Results of calculation of complex currents on loadings and interuser's sites of main line DEN of the set structure are resulted, not which all parametres are measured and supervised.

Keywords: a distributive network, network model, a program complex, calculation of complex currents and voltages.

Введение. Эффективность работы распределительных электрических сетей (РЭС) во многом определяется уровнем их автоматизации и информатизации. Для этой цели в настоящее время внедряются программно-аппаратные комплексы-автоматизированные системы контроля и учета электроэнергии (АСКУЭ) [1, 2]. Основные достоинства существующих (традиционных) АСКУЭ заключаются в следующем:

- 1) автоматизация процесса сбора данных со счетчиков электроэнергии без участия инспекторов (контролеров) энергосбыта;
- 2) исключение человеческого фактора при сборе данных об энергопотреблении, что позволяет устранить коррупционные схемы;
- 3) автоматическое отключение нагрузки абонента при несвоевременной оплате за использованную электроэнергию;

4) автоматическое отключение нагрузки абонента при превышении установленного лимита по потребляемой мощности в соответствии с техническими условиями на подключение энергии;

5) оперативное составление энергобаланса в системе.

В то же время в составе традиционных АСКУЭ отсутствуют программные и технические средства, предназначенные для решения диагностических и оптимизационных задач, что не позволяет достичь высокой эффективности этих систем и автоматизируемых распределительных сетей. В частности, к классу таких проблем относятся задачи диагностики состояний магистральной линии (МЛ) [3-5] и симметрирования распределенной сети [6-9]. С другой стороны решение указанных задач предполагает разработку соответствующих методов и цифровых технологий, основой которых выступают математические модели РЭС. Анализ показывает, что практическое применение известных моделей [10-13] в режиме реального времени приводит к определенным сложностям, что связано с рядом факторов. В частности, к ним относятся фактор несимметрии токов и напряжений в трехфазной сети [14-17]. В [18] предложен метод идентификации модели распределенной сети, функционирующей в условиях несимметрии токов и напряжений. Для реализации вычислительной схемы его алгоритма в настоящее время разработан комплекс программных средств в среде Matlab [19]. В данной статье приводятся результаты его применения для расчета комплексных токов и напряжений трехфазной сети в заданных узлах, что дает возможность идентифицировать не контролируемые средствами АСКУЭ состояния межабонентских участков (МАУ) магистральной линии (МЛ).

Постановка задачи. В качестве объекта исследования рассматривается четырехпроводная РЭС напряжением 0,4 кВ, расчетная схема которой показана на рис. 1.

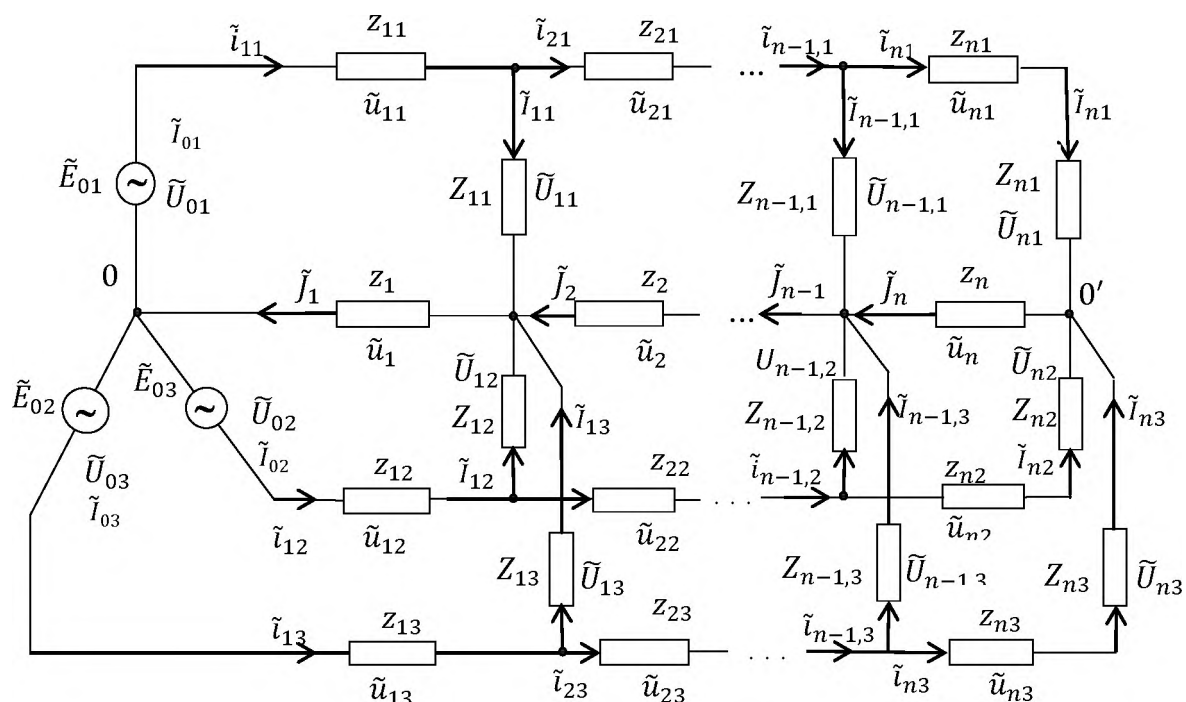


Рис.1. Расчетная схема трехфазной сети

Обозначения имеют следующий смысл: k, v - индексные переменные, обозначающие соответственно номера фаз А, В, С ($k = \overline{1,3}$) и электрических контуров сети ($v = \overline{1,n}$); \tilde{E}_{0k} - ЭДС k -ой фазы; $\tilde{U}_{0k}, \tilde{I}_{0k} = \tilde{i}_{1k}$ - мгновенные синусоидальные напряжения и токи соответственно на входах соответствующих фаз; $\tilde{I}_{vk}, \tilde{U}_{vk}, Z_{vk}$ - синусоидальные мгновенные ток, напряжение и сопротивление нагрузки (электроприемника) с координатой (v, k) ; \tilde{i}_{vk}, z_{vk} - мгновенный ток и комплексное сопротивление v -го межабонентского участка (МАУ) k -ой

фазы; $\tilde{u}_{\nu k}, \tilde{u}_\nu$ – напряжения соответственно на ν -ом МАУ k -й фазы и нейтрального провода; \tilde{I}_ν, Z_ν – мгновенный ток и комплексное сопротивление ν -го участка нейтрального провода.

Далее предполагается, что выполняются следующие условия:

- 1) трехфазная сеть является линейной системой;
- 2) фазные и нейтральные провода сети имеют одинаковые сечения, т.е. межабонентские сопротивления $Z_{\nu k} = Z_\nu$ ($k = \overline{1,3}, \nu = \overline{1,n}$);
- 3) в системе используются технические средства для подавления высших гармонических составляющих токов и напряжений в сети;
- 4) со счетчиков электроэнергии (СЧ $_{\nu k}$), установленных у абонентов сети и в трансформаторной подстанции, в базу данных АСКУЭ по каналам связи в дискретные моменты времени $t \in [t_\xi, t_{\xi+1}]$ с шагом дискретизации $\Delta t_\xi = t_{\xi+1} - t_\xi$ ($\xi = 1,2, \dots$) поступают следующие данные:

- действующие значения токов $I_{\nu k}$ и напряжений $U_{\nu k}$ на нагрузках сети;
- коэффициенты мощности $c_{\nu k} = \cos \varphi_{\nu k}$, определяемые фазовыми сдвигами $\varphi_{\nu k}$ между соответствующими напряжениями $\tilde{U}_{\nu k}$ и токами $\tilde{I}_{\nu k}$ ($k = \overline{1,3}, \nu = \overline{0,n}$).

Как известно, мгновенные синусоидальные переменные трехфазной сети ($\tilde{I}_{\nu k}, \tilde{U}_{\nu k}, i_{\nu k}, j_\nu$) и сопротивления на нагрузках ($Z_{\nu k}$) в установившемся режиме можно представить в комплексной форме [13, 15]:

$$\dot{i}_{\nu k} = I_{\nu k} e^{j(\beta_k + \alpha_{\nu k})}, \tag{1}$$

$$\dot{U}_{\nu k} = U_{\nu k} e^{j(\beta_k + \psi_{\nu k})},$$

$$Z_{\nu k} = \bar{Z}_{\nu k} e^{j\varphi_{\nu k}}, \quad \nu = \overline{0,n}, \quad k = \overline{1,3},$$

$$i_{\nu k} = I_{\nu k} e^{j(\beta_k + \tilde{\alpha}_{\nu k})}, \tag{2}$$

$$j_\nu = i_{\nu 1} + i_{\nu 2} + i_{\nu 3}, \quad \nu = \overline{1,n},$$

где $I_{\nu k}, U_{\nu k}, \bar{Z}_{\nu k}, l_{\nu k}$ – модули комплексных переменных $\dot{i}_{\nu k}, \dot{U}_{\nu k}, Z_{\nu k}, i_{\nu k}$ соответственно; $\alpha_{\nu k}, \psi_{\nu k}, \tilde{\alpha}_{\nu k}$ – приращения фазовых сдвигов соответствующих токов и напряжений относительно их базовых значений β_k , обусловленные несимметрией токов и напряжений в сети. При этом

$$\varphi_{\nu k} = \psi_{\nu k} - \alpha_{\nu k}, \quad \beta_k = 2(k - 1) \pi / 3.$$

Отметим, что в существующих АСКУЭ с помощью счетчиков электроэнергии измеряются лишь действующие значения токов $I_{\nu k}$ и напряжений $U_{\nu k}$ на нагрузках сети, а соответствующие комплексные величины не контролируются (не измеряются). Таким образом, из выражений (1) и (2) видно, что задача построения математической модели трехфазной сети в комплексной форме сводится к идентификации приращений фазовых сдвигов $\alpha_{\nu k}$ и $\tilde{\alpha}_{\nu k}$, а также действующих значений (модулей) $l_{\nu k}$ межабонентских токов $i_{\nu k}$ ($\nu = \overline{1,n}, k = \overline{1,3}$).

Задача заключается в идентификации неконтролируемых (неизмеряемых) комплексных токов по данным АСКУЭ, описывающих электрическое состояние несимметричной РЭС заданной структуры.

Метод решения сформулированной выше задачи описан в [18]. На его основе разработан комплекс программных средств для расчета указанных комплексных переменных распределенной сетью напряжением 0,4 кВ. При этом исходные данные задачи идентификации в программном обеспечении представлены в виде следующих матрицы:

$$I = \begin{bmatrix} I_{11} & I_{21} & \dots & I_{n1} \\ I_{12} & I_{22} & \dots & I_{n2} \\ I_{13} & I_{23} & \dots & I_{n3} \end{bmatrix},$$

$$U = \begin{bmatrix} U_{11} & U_{21} & \dots & U_{n1} \\ U_{12} & U_{22} & \dots & U_{n2} \\ U_{13} & U_{23} & \dots & U_{n3} \end{bmatrix},$$

$$c = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{21} & \dots & c_{n1} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{n2} \\ c_{13} & c_{23} & \dots & c_{n3} \end{bmatrix}.$$

В качестве примера рассматривается структура распределительной сети для случая, когда $n=5$. Для данного примера указанные матрицы имеют следующий вид:

$$I = \begin{bmatrix} 5 & 1,5 & 3,8 & 5,9 & 5,2 \\ 0,5 & 0,51 & 0,59 & 0,54 & 0,488 \\ 0,55 & 0,49 & 0,57 & 0,52 & 0,51 \end{bmatrix},$$

$$U = \begin{bmatrix} 224,0 & 220,0 & 210,0 & 195,0 & 190,0 \\ 221 & 218 & 216 & 185 & 180 \\ 223 & 220 & 216 & 190 & 186 \end{bmatrix},$$

$$c = \begin{bmatrix} 0,85 & 0,85 & 0,9 & 0,8 & 0,84 \\ 0,82 & 0,83 & 0,92 & 0,87 & 0,87 \\ 0,88 & 0,8 & 0,9 & 0,84 & 0,83 \end{bmatrix}.$$

Исходные данные, представленные в матрицах I и U , приведены на рис. 2 и 3.

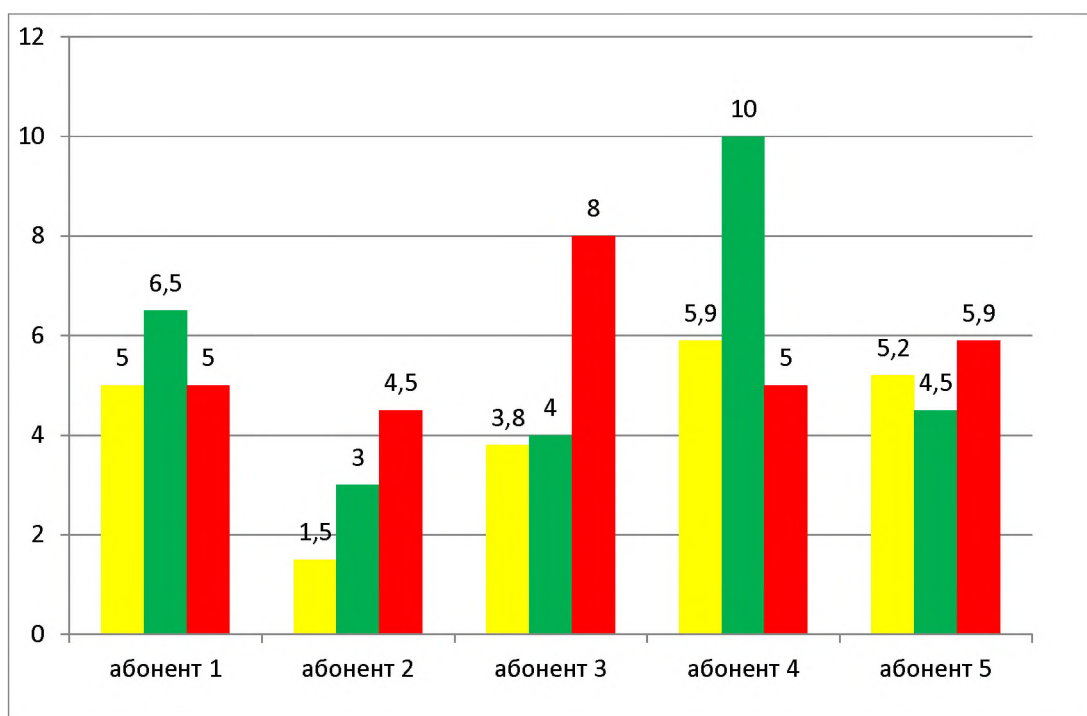


Рис.2. Измеренные токи нагрузок абонентов

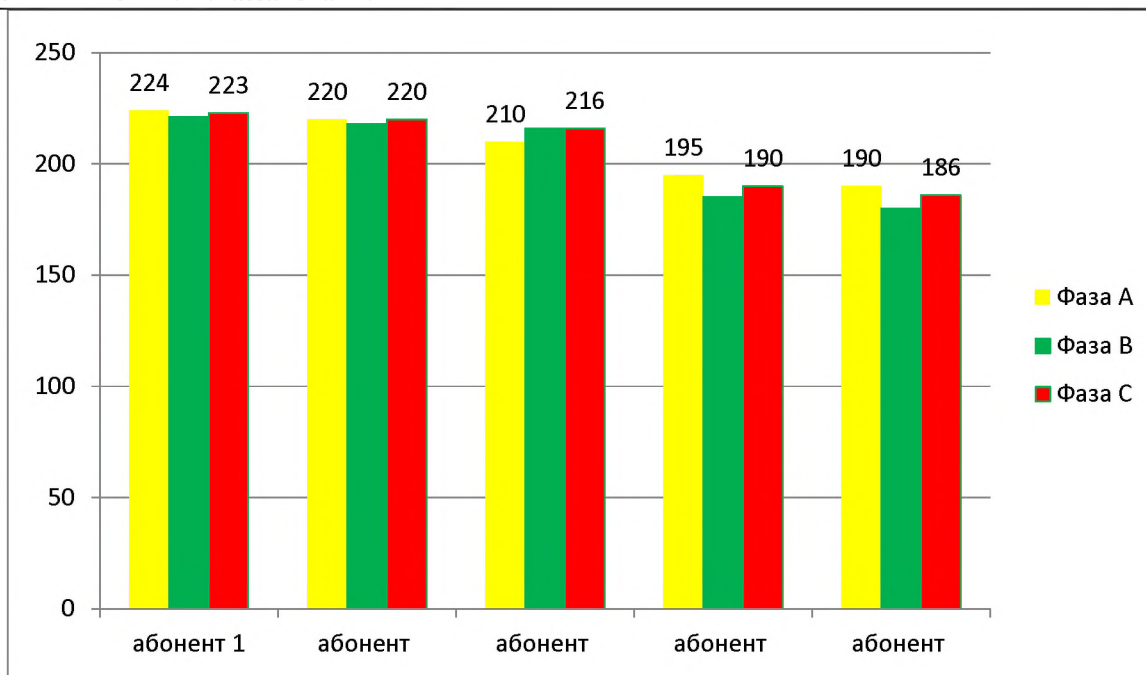


Рис.3. Измеренные напряжения нагрузок абонентов

Ниже приводятся численные расчеты, полученные с использованием разработанного программного комплекса. В табл. 1-2 представлены результаты расчетов комплексных токов на нагрузки абонентов и МАУ распределити, а в табл. 3-4 приведены результаты для нулевого провода.

Таблица 1.

Наименование фаз	Составляющие комплексных токов $I_{\nu k}$ Координаты нагрузки $Z_{\nu \xi}$	$I_{\nu k}^B$	$I_{\nu k}^M$	$I_{\nu k}$	$\alpha_{\nu k}$
		(A)	(A)	(A)	(рад)
Фаза А ($k = 1$)	$\nu=1$	4,32	2,5	5	0,52
	$\nu=2$	1,3	0,75	1,5	0,53
	$\nu=3$	3,2	2,05	3,8	0,57
	$\nu=4$	5,2	2,78	5,9	0,5
	$\nu=5$	4,51	2,58	5.2	0,51
Фаза В ($k = 2$)	$\nu=1$	5,69	3,14	6,5	0,5
	$\nu=2$	2,62	1,46	3,44	0,51
	$\nu=3$	3,32	2,23	4	0,59
	$\nu=4$	8,56	5,16	10	0,54
	$\nu=5$	3,96	2,12	4,5	0,488
Фаза С ($k = 3$)	$\nu=1$	4,26	2,62	5	0,55
	$\nu=2$	3,96	2,12	4,5	0,49
	$\nu=3$	6,73	4,32	8,0	0,57
	$\nu=4$	4,34	2,48	5	0,52
	$\nu=5$	5,145	2,87	5,9	0,51

Наименование фаз	Составляющие комплексных токов $i_{\nu k}$ Координаты МАУ	$i_{\nu k}^B$ (А)	$i_{\nu k}^M$ (А)	$I_{\nu k}$ (А)	$\tilde{\alpha}_{\nu k}$ (рад)
Фаза А ($k = 1$)	$\nu=1$	18,53	8,68	21,234	0,438
	$\nu=2$	14,21	8,16	16,239	0,521
	$\nu=3$	12,91	7,41	14,738	0,521
	$\nu=4$	9,71	5,36	10,949	0,504
	$\nu=5$	4,51	2,58	5,196	0,521
Фаза В ($k = 2$)	$\nu=1$	24,15	14,11	27,969	0,528
	$\nu=2$	18,46	10,97	21,473	0,535
	$\nu=3$	15,84	9,51	18,48	0,54
	$\nu=4$	12,52	7,28	14,5	0,528
	$\nu=5$	3,96	2,12	4,492	0,49
Фаза С ($k = 3$)	$\nu=1$	24,44	14,41	28,372	0,535
	$\nu=2$	20,18	11,79	23,37	0,528
	$\nu=3$	16,22	9,67	18,88	0,54
	$\nu=4$	9,49	5,35	10,89	0,514
	$\nu=5$	5,15	2,87	5,89	0,514

Таблица 3

Наименование фаз	Составляющие комплексных наир. u_{ν} Координаты МАУ	u_{ν}^B (В)	u_{ν}^M (В)	$u_{\nu}(В)$	θ_{ν} (рад)
Нейтраль	$\nu=1$	0,33	0,522	0,59	0,802
	$\nu=2$	0,26	0,42	0,47	0,826
	$\nu=3$	0,25	0,25	0,38	0,593
	$\nu=4$	0,17	0,16	0,23	0,54
	$\nu=5$	0,037	0,084	0,089	0,988

Таблица 4

Наименование фаз	Составляющие комплексных токов $i_{\nu k}$ Координаты МАУ	J_{ν}^B (А)	J_{ν}^M (А)	$J_{\nu}(А)$	θ_{ν} (рад)
Нейтраль	$\nu=1$	5,5	5,8	7,99	0,802
	$\nu=2$	4,39	4,7	6,44	0,826
	$\nu=3$	3,08	2,1	3,73	0,593
	$\nu=4$	2,78	1,76	3,3	0,54
	$\nu=5$	0,61	0,93	1,11	0,988

Для наглядности полученные численные результаты иллюстрированы в виде диаграмм, которые показаны на рис.4-6

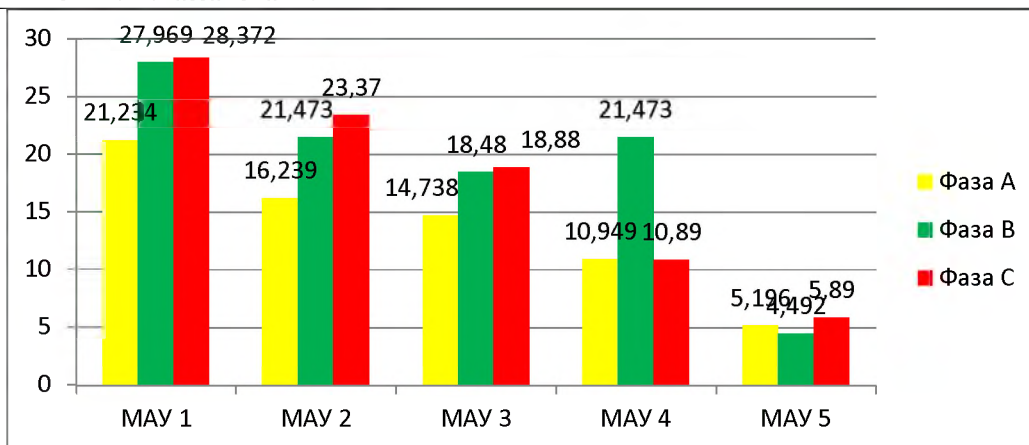


Рис.4. Действующие токи в межабонентских участках МЛ

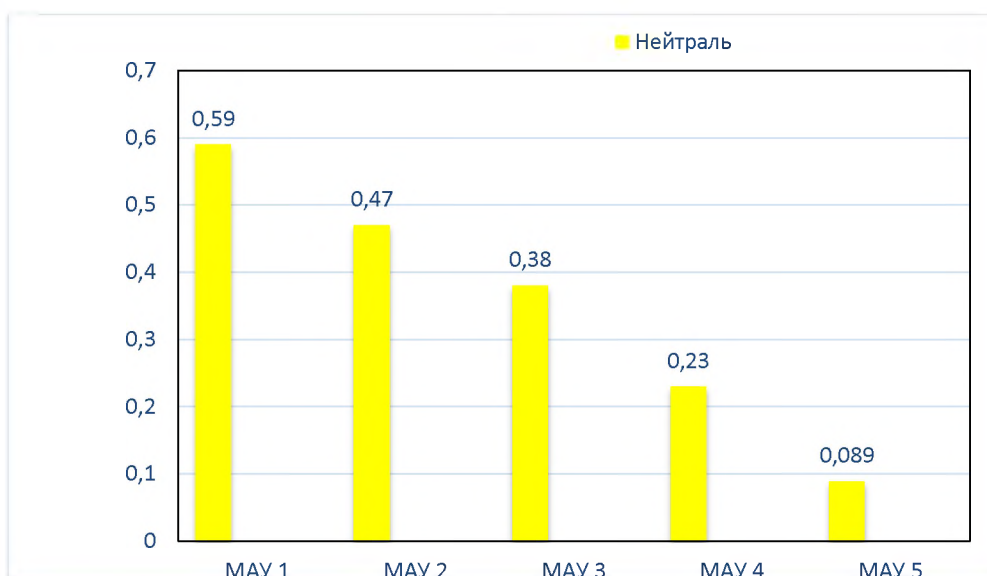


Рис.5. Действующие напряжения в межабонентских участках МЛ

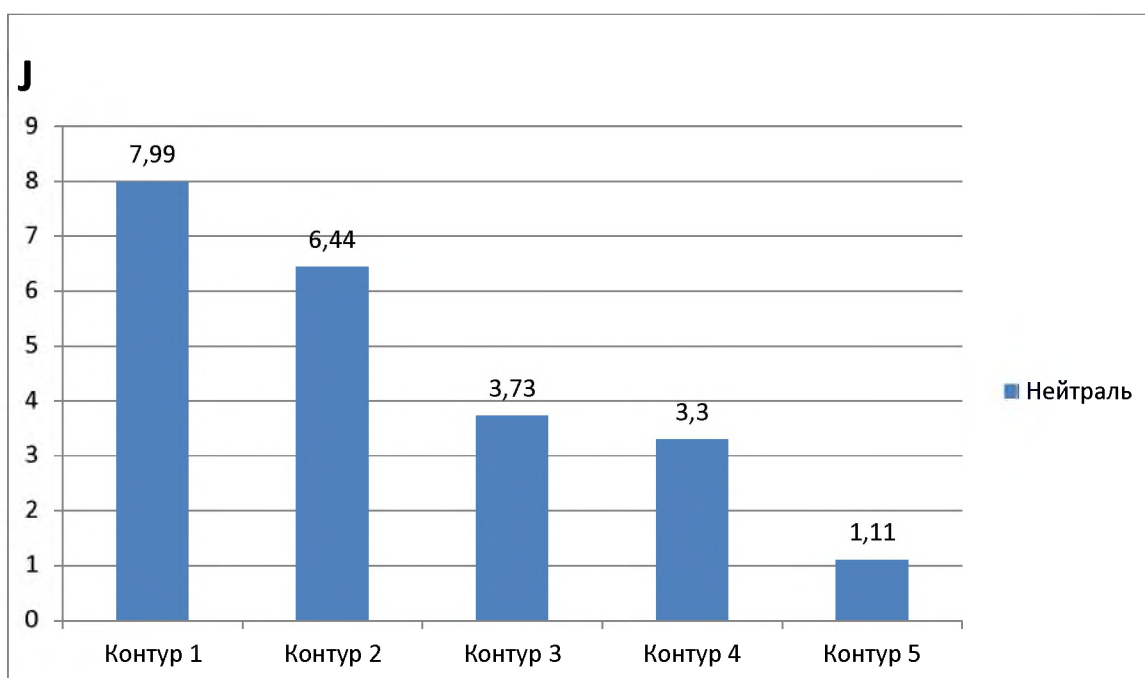


Рис.6. Действующие токи в нейтральном проводе в межабонентских участках МЛ

Анализ полученных численных результатов показывает, что предложенный метод идентификации модели трехфазной сети, предложенный в [18, 20], показывает в полной степени определяет её электрическое состояние, включая неизмеряемые и неконтролируемые состояния межабонентских участков распределительной сети.

Выводы

С использованием программного комплекса, разработанного на основе метода идентификации модели несимметричной распределительной сети, выполнен расчет комплексных токов и напряжений, описывающих электрическое состояние трехфазной сети напряжением 0,4кВ. При этом в качестве исходных данных использованы текущие значения действующих токов и напряжений на нагрузках сети, а также соответствующие коэффициенты мощности между ними. Последние измеряются с помощью электронных счетчиков электроэнергии, установленных у абонентов сети и на выходе трансформаторной подстанции. Разработанный комплекс позволяет идентифицировать электрическое состояние межабонентских участков магистральной линии, включая нулевой провод, токи и напряжений которых не измеряются и не контролируются в традиционных АСКУЭ.

Полученные результаты ориентированы для совершенствования современных АСКУЭ на основе создания в их составе новых подсистем, предназначенных для решения диагностических и оптимизационных задач в целях повышения эффективности распределительных сетей.

Литература

1. Еремина М.А. Развитие автоматических систем коммерческого учета энергоресурсов (АСКУЭ) // Молодой ученый. 2015. №3. С. 135-138.
2. Якушев К.В. Автоматизированная система коммерческого учета электроэнергии для розничного рынка // Информатизация и системы управления в промышленности. 2009. №3 (23) [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://isup.ru/articles/6/335/>. (04.11.2019).
3. Киншт Н.В. Диагностика электрических цепей и систем / Н.В. Киншт, Н.Н. Петрунько. – Владивосток: Дальнаука, 2013. 242 с.
4. Фардиев И.Ш., Минулин Р.Г., Закамский Е.В., Андреев В.В., Губаев Д.Ф. Диагностика воздушных линий распределительных электрических сетей. // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2004. № 7-8. С. 41-49.
5. Ершов, А.М. Система защиты электрической сети напряжением 380В от обрывов воздушной линии / А.М.Ершов, О.В. Филатов, А.В. Молоток // Электрические станции. 2016. №5. С.28-33.
6. Киселев М.Г., Лепанов М.Г. Симметрирование токов в сетях электроснабжения силовым электрическим регулятором неактивной мощности // Электротехника. 2018. №11. С. 63-70.7.
7. Патент №217.015.75. Самокиш Вячеслав Васильевич (РФ) Способ симметрирования фазных токов распределительной сети 0,4 кВ и устройство для его осуществления 13.01.2017.
8. Оморов Т.Т., Такырбашев Б.К. К проблеме оптимизации несимметричных режимов работы распределительных сетей // Приборы и системы. Управления, контроль, диагностика. 2016. №6. С. 11-15.
9. Оморов Т.Т. Симметрирование распределенной электрической сети методом цифрового регулирования // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. Т. 19. № 3. С. 194-200.
10. Кочергин С.В., Кобелев А.В., Хребтов Н.А., Киташин П.А., Терехов К.И. Моделирование сельских распределительных электрических сетей 10/0,4 кВ // Fractal simulation. 2013. №1. С.5-13.

11. Степанов А.С., Степанов С.А., Костюкова С.С. Идентификация параметров моделей элементов электрических сетей на основе теоремы Теллегена // Электротехника. 2016. №7. С. 8-11.
12. Зеленский Е.Г., Кононов Ю.Г., Левченко И.И. Идентификация параметров распределительных сетей по синхронизированным измерениям токов и напряжений // Электротехника. 2016. №7. С.3-8.
13. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин А.В. Теоретические основы электротехники / Т.1, СПб.: Питер, 2009. 512 с.
14. Пономаренко О.И., Холиддинов И.Х. Влияние несимметричных режимов на потери мощности в электрических сетях распределенных систем электроснабжения // Энергетик. 2015. №12. С.6-8.
15. Оморов Т.Т. Оценка влияния несимметрии токов и напряжений на потери электроэнергии в распределительной сети с использованием АСКУЭ // Электричество. 2017. № 9. С. 17-23.
16. Железко, Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии / Ю.С. Железко. М.: ЭНАС, 2009. 456с.
17. Косоухов Ф.Д., Васильев Н.В., Филиппов А.О. Снижение потерь от несимметрии токов и повышение качества электрической энергии в сетях 0,38 кВ с коммунально-бытовыми нагрузками // Электротехника. 2014. №6. С. 8-12.
18. Оморов Т.Т., Такырбашев Б.К., Осмонова Р.Ч. К проблеме математического моделирования трехфазной несимметричной распределительной сети // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22. №1. С. 93-102.
19. И.В.Черных. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. -М.: ДМК Пресс, СПб: Питер, 2008. 288 с.
20. Оморов Т.Т. Проблемы совершенствования современных АСКУЭ/ Такырбашев Б.К., Койбагаров Т.Дж., Джаныбаев Т.О. // “Известия КГТУ” Информационные технологии. №2. 1 часть (50). 2019. С.168-176