

Е.И. Сокол, Ю.А. Сиротин, Т.С. Иерусалимова, О.Г. Гриб, С.В. Швец, Д.А. Гапон

СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ РАБОТЫ ТРЕХФАЗНОЙ СЕТИ

Інтеграція інтелектуальних та мережецентричних технологій у процес управління режимами роботи трифазної мережі забезпечують оперативність компенсації нелінійностей в системі за рахунок ортогонального розкладання струму і використання методу базисних функцій для мінімізації втрат. Бібл. 9, рис. 5.

Ключові слова: мережецентричне управління, беспилотный літальний апарат, втрати, якість, моніторинг, миттєва потужність.

Интеграция интеллектуальных и сетевых технологий в процесс управления режимами работы трехфазной сети обеспечивают оперативность компенсации нелинейностей в системе за счет ортогонального разложения тока и использования метода базисных функций для минимизации потерь. Библ. 9, рис. 5.

Ключевые слова: сетевое управление, беспилотный летательный аппарат, потери, качество, мониторинг, мгновенная мощность.

Введение и постановка проблемы. Системные процессы интеллектуализации электроэнергетической системы Украины основаны на внедрении технологий Smart Grid. Ценность этой технологической трансформации – перераспределить потребность в электроэнергии в моменты максимальной нагрузки, сократить дополнительные инвестиции в реорганизацию энергосистемы для повышения ее производительности [1]. Многоуровневое развитие системы управления режимами работы трехфазной сети подразумевает использование принципа сетевости – управления разнородными объектами инфраструктуры энергосистемы в едином информационно-коммуникационном управленческом пространстве благодаря формированию и поддержанию единой для всех ярусов управления целостной, контекстной информационной среды [2].

Концепция сетевого управления режимами работы трехфазной сети подразумевает формирование и поддержание в актуальном состоянии единого для всей системы образа реального состояния в максимально понятном и простом виде. Одним из способов достижения этих целей управления является внедрение в систему оперативного обслуживания энергосистемы [1], кроме распределенной подсистемы цифровых измерительных модулей, группы беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для мониторинга состояния трехфазной сети [3]. Мультиагентные технологии сбора и передачи информации с помощью БПЛА обеспечивают непрерывность получения и актуальность контекстного информационного образа трехфазной сети.

Реактивность, асимметрия и нелинейность нагрузки в трехфазной системе приводят к наличию неактивных составляющих полной мощности и вызывает не только дополнительные потери электроэнергии, но и является причиной появления пульсаций мгновенной мощности (ММ) – энергетической неуравновешенности системы. Это служит причиной уменьшения коэффициента полезного действия, способствует возникновению опасных резонансных явлений при работе оборудования.

Анализ последних исследований и публикаций. Эффективность использования электрической

энергии определяется в основном созданием таких условий её потребления, при которых обеспечивается требуемое качество поставки электрической энергии при минимальных потерях [4, 5]. Качество поставки электроэнергии может существенно влиять на расход электроэнергии, надежность системы электроснабжения [6]. Превышение показателей качества электроэнергии выше допустимых приводит к сокращению срока службы оборудования, понижению его эффективности и нарушению технологического процесса. Минимизация потерь в 3-фазной системе существенно связана с возможностью сокращения дополнительных потерь, которые обусловлены узлами потребления с несимметричными и нелинейными нагрузками [7].

Цель исследований – развитие методов компенсации неактивной составляющей мгновенной мощности при наличии несимметричной нагрузки в условиях сетевого управления режимами работы трехфазной сети.

Основные материалы исследований. 3-проводная схема является частным случаем 4-проводной схемы. Введенные определения несбалансированного (сбалансированного, реально сбалансированного) и неуравновешенного (уравновешенного) режимов остаются в силе и для 3-проводной схемы. Однако для классификации режимов используются ММ 0-уравновешенных процессов.

В 3-проводной цепи:

– активная мгновенная мощность полностью определена 0-уравновешенными процессами тока и напряжения

$$p(t) = p_1(t) = \dot{i}_1 \bullet u_1,$$

– векторная ММ совпадает со своей 0-составляющей

$$q(t) = q_0(t) = q_0(t)e_0$$

и полностью определена $q_0 = q_0(t) = [i \times u] \bullet e_0$ – алгебраической проекцией векторной ММ на орт e_0 , которую назовем скалярной неактивной ММ.

Разложения мгновенных мощностей на постоянную и переменную составляющие для:

– активной ММ:

$$\bar{p}_1 = \frac{1}{T} \int_{\tau}^{\tau+T} p_1(t) dt; \quad p_1(t) = \bar{p}_1 + \tilde{p}_1(t), \quad (1)$$

где $\tau \geq 0$ – произвольное число;

– неактивной (скалярной) ММ:

$$\bar{q}_0 = \frac{1}{T} \int_{\tau}^{\tau+T} q_0(t) dt; \quad \tilde{q}_0(t) = q_0(t) - \bar{q}_0, \quad (2)$$

классифицируют процессы в 3-проводной цепи.

Если активная ММ не имеет переменной (пульсирующей) компоненты $\tilde{p}_1(t) \equiv 0$, то режим уравновешен. В общем случае $\tilde{p} = p(t) - \bar{p} \neq 0$ и режим неуравновешен.

Так как $q(t) = q_0(t) = q_0(t)e_0$, то режим:

– при котором неактивная ММ не имеет переменной составляющей $\tilde{q}_0 = \tilde{q}_0(t) \equiv 0$ – сбалансирован;

– при котором неактивная ММ тождественно равна нулю $q_0(t) \equiv 0$ – реально сбалансирован.

Отметим, что симметричный синусоидальный режим уравновешен и сбалансирован, однако реально несбалансирован, если стандартная реактивная мощность не равна нулю.

Разложение тока в 4-проводной сети с выделением нулевой последовательности (НП). Для 4-проводной схемы справедливо разложение тока $i = i_0 + i_1$. Базисные кривые $w_1(t)$, $w_2(t)$ процессов 3-проводной схемы, которые используются для разложения компоненты тока i_1 , дополняются ортом НП.

Вектор напряжения u (измеренный относительно произвольной точки отсчета) определяет два ортогональных 0-уравновешенных вектора:

– вектор фазных напряжений (с помощью матрицы проектора $u_1 = D_1 \times u$) и

– вектор межфазных напряжений (с помощью косимметрической матрицы $u_{||} = K^* \times u_1$).

В каждый момент времени тройка векторов: $w_1(t)$, $w_2(t)$, e_0 образует ортонормированный базис пространства $S^{(3)}$, так как выполнено условие ортонормированности

$$\begin{bmatrix} w_1^* \\ w_2^* \\ - \\ e_0^* \end{bmatrix} \times [w_1 w_2 | e_0] = \begin{bmatrix} w_1^* w_1 & w_1^* w_2 & w_1^* e_0 \\ w_2^* w_1 & w_2^* w_2 & w_2^* e_0 \\ e_0^* w_1 & e_0^* w_2 & e_0^* e_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Справедливо ортогональное разложение тока:

$$i(t) = \underbrace{i_1 w_1 + i_2 w_2}_i + \underbrace{i_0 w_0}_{i_0} = \underbrace{(i_1^* w_1)}_{i_1} + \underbrace{(i_2^* w_2)}_{i_2} + i_0(t) e_0, \quad (4)$$

так как $i = i_1 + i_0$, и $i_0 \perp u_1$; $i_0 \perp u_{||}$, то для коэффициентов разложения (4) справедливо:

$$i_1 = i^* \cdot w_1 = (i_1 + i_0)^* \times \frac{u_1}{|u_1|} = \frac{i_1^* \cdot u_1}{|u_1|} = \frac{p_1}{|u_1|}; \quad (5)$$

$$\begin{aligned} i_2 &= i^* \cdot w_2 = (i_1 + i_0)^* \times \frac{u_{||}}{|u_{||}|} = \frac{i_1^* (u_1 \times e_0)}{|u_1|} = \\ &= \frac{e_0 (i_1 \times u_1)^*}{|u_1|} = \frac{q_0(t)}{|u_1|}, \end{aligned} \quad (6)$$

$$i_0(t) = i^* \cdot e_0. \quad (7)$$

Поэтому разложение (4) получается из разложения для 3-проводной схемы

$$i_0 = i_1 + i_2 = \frac{p_1(t)}{u_1} w_1 + \frac{q_0(t)}{u_1} w_{||}, \quad (8)$$

дополнительным слагаемым (7). Это дает разложение тока для 4-проводной цепи (рис. 1) в векторно-матричной форме:

$$i(t) = i_1 + i_2 + i_0 = [w_1 \quad w_{||} \quad e_0] \times \begin{bmatrix} p_1(t)/u_1 \\ q_0(t)/u_1 \\ i_0(t) \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$u_1 \neq 0.$$

Разложение справедливо при любом напряжении $u_0(t)$ 0-последовательности.

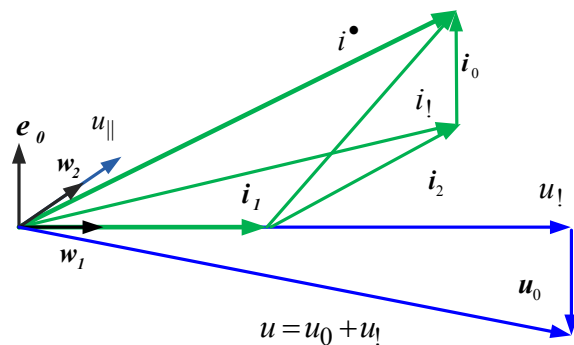


Рис. 1. Разложение тока и напряжения в 4-проводной системе ($u_0 || e_0$)

Так как $p_0 = u_0 \cdot i_0$, то компенсация тока 0-последовательности тока всегда компенсирует мощность 0-последовательности ($i_0 = 0 \Rightarrow p_0 = 0$). Обратное утверждение не верно. Кроме того, при этом компенсируется и часть векторной ММ.

Предложенный метод базиса расширяет векторный метод [8, 9] для любого напряжения НП $u_0(t)$ и показывает, что различные теории ММ 3-проводной схемы обусловлены выбором базиса в 2-мерном подпространстве L_1^2 .

Особенности компенсации методом базисных функций. До компенсации ток в сети нагрузки равен току источника $i_s(t) = i_L(t) = i(t)$ и может содержать ток 0-последовательности вне зависимости от наличия ($u_0 \neq 0$) или отсутствия ($u_0 = 0$) смещения напряжения.

Компенсация тока 0-последовательности i_0 исключает из цепи источника:

– активную ММ 0-последовательности (как ее постоянную, так переменную составляющие при любом напряжении 0-последовательности);

– компоненту векторной ММ, обусловленную током НП.

Причем выполняется эта процедура без задержки по времени, так как не требует интегрирования. Не требует интегрирования и компенсация 0-уравновешенной компоненты тока i_2 (коллинеарная межфазному напряжению), которая определяет неактивную ММ, обусловленную 0-уравновешенными процессами тока и напряжения. Компенсация токов

$i_0(t)$ и $i_2(t)$ равносильна компенсации векторной ММ и 0-компоненты активной мощности (если $u_0 \neq 0$) и осуществляется без задержки по времени. Компенсация части активного тока:

$$\tilde{i}_1 = \frac{\tilde{p}_1(t)}{u_1} w_1 = (p_1(t) - P_1) \frac{u_1}{u_1^2} \quad (10)$$

ассоциирована с пульсирующей составляющей активной ММ и потребует интегрирования. При этом, коэффициенты разложения определяют связь вектора тока в $\alpha\beta$ координатах ортонормированного базиса в 2-мерном подпространстве L_1^2 и мгновенными мощностями и их можно находить без промежуточных вычислений непосредственно используя измеренные вектора мгновенных значений токов $i(t)$ и мгновенных значений напряжений $u(t)$.

Алгоритм и реализация программы разложения тока

$$i(t) = \frac{p_1(t)}{u_1(t)} w_1(t) + \frac{q_0(t)}{u_1(t)} w_{||}(t) + i_0(t) e_0 \quad (11)$$

определен следующими процедурами:

– вычисление 0-уравновешенного вектора фазного и межфазного напряжения:

$$u_1(t) = D_1 u(t), \quad u_{||}(t) = K \bullet u(t); \quad (12)$$

– вычисление активной ММ и неактивной ММ 0-уравновешенного режима:

$$p_1(t) = i \bullet u_1 = i \bullet D_1 u, \quad (13)$$

$$q_0(t) = i \bullet u_{||} = i \bullet K \bullet u. \quad (14)$$

Методом визуального программирования Simulink реализована программа в пакете Matlab. Пакет Matlab конструирует блок – схему программы с помощью палитры компонентов математических моделей различных специфицированных электро-энергетических устройств. Разработанная программа, реализует также разложение тока (15), первая составляющая, которого обеспечивает электроснабжение с постоянной мощностью:

$$i = \frac{P}{u_1} w_1 + \underbrace{\frac{\tilde{p}_1(t)}{u_1} w_1 + \frac{q_0(t)}{u_1} w_1}_{\text{compensated current}} + i_0(t) e_0. \quad (15)$$

Результаты моделирования (рис. 2-5) качественно представляют энергетические процессы в 4-проводной схеме электроснабжения, в частности, подтверждают (рис. 2) теоретически известное поведение активного и неактивного тока pq -теории в синусоидальном режиме при симметричном напряжении: активный ток, реализующий активную ММ и реактивный ток, реализующий векторную ММ (вторая и третья паллета сверху) содержат гармонику 3-порядка. Активный ток, реализующий интегральную активную мощность:

$$i_S = u_1 \left(\frac{P}{u_1^2} \right), \quad (16)$$

(рис. 5, нижняя паллета) и обеспечивает режим потребления, с током в цепи источника при котором:

– ток 0-уравновешен $i_0(t) \equiv 0 \Leftrightarrow q'(t) \equiv 0$ (средняя паллета рис. 5);

– режим реально сбалансирован $q_0(t) \equiv 0$ (верхняя паллета рис. 5);

– режим уравновешен $p_1(t) \equiv \bar{p}_1 = P_1$ (нижняя паллета рис. 5).

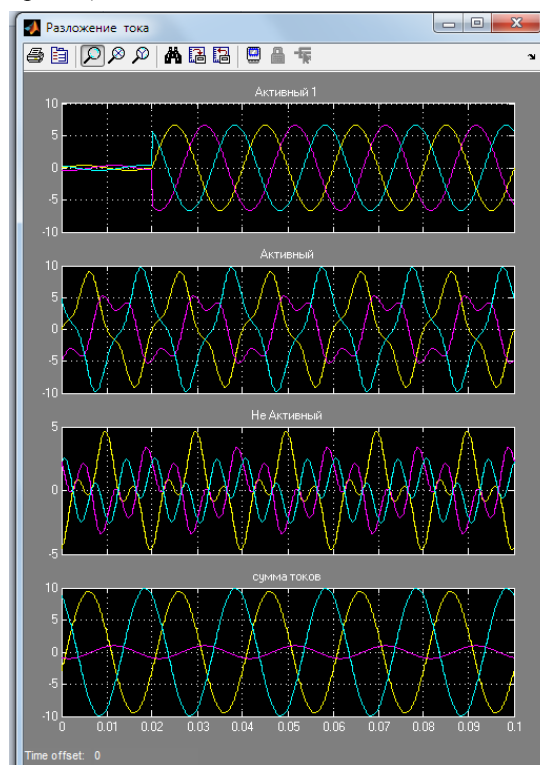


Рис. 2. Осциллограммы разложения полного тока на компоненты

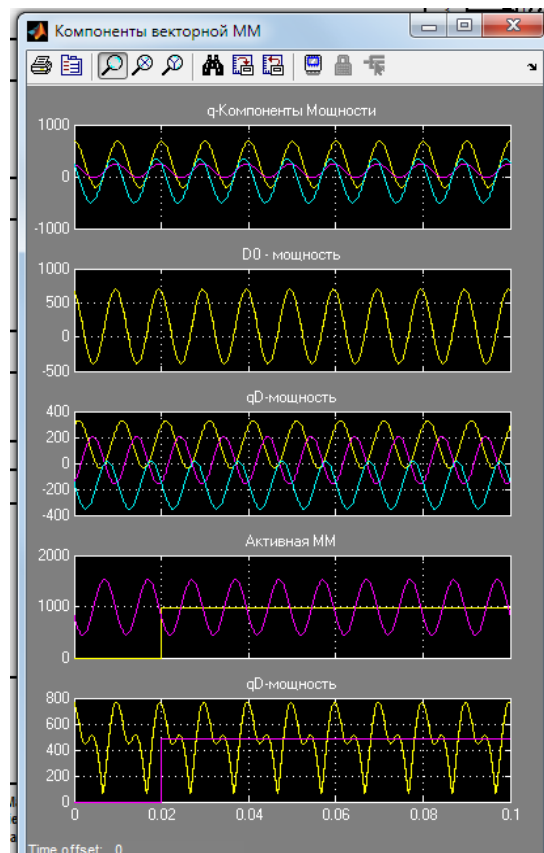


Рис. 3. Осциллограммы разложения векторной и скалярной ММ на составляющие

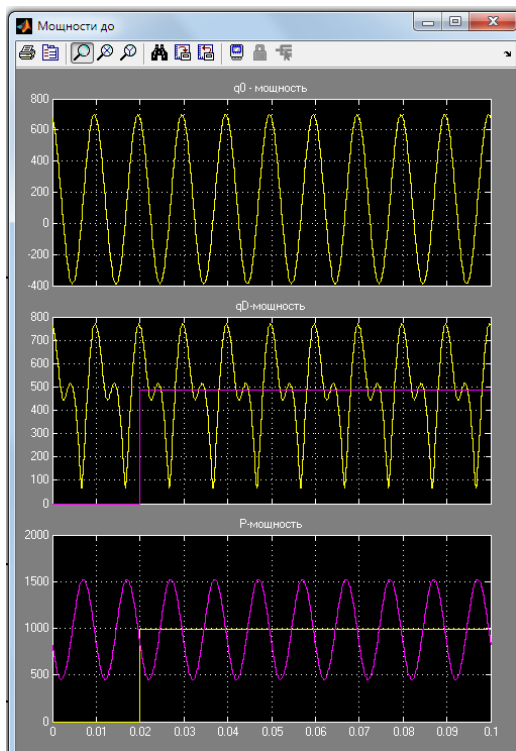


Рис. 4. Осциллограммы скалярной ММ и составляющих векторной ММ до компенсации

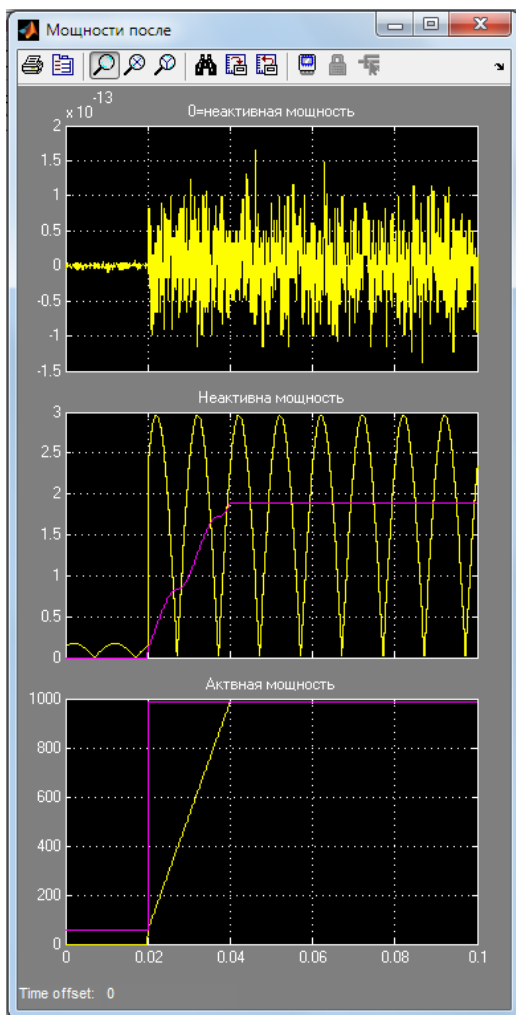


Рис. 5. Осциллограммы скалярной ММ и составляющих векторной ММ после компенсации

Выводы. Сетевые технологии управления режимами работы трехфазной сети с использованием мультиагентных способов сбора и передачи информации с помощью БПЛА обеспечивают непрерывность получения и актуальность контекстного информационного образа состояния энергосистемы.

Рассмотрен случай разложения мгновенных мощностей на постоянную и переменную составляющие для 3-проводной системы. Выделены особенности баланса мощности для разных режимов ее функционирования. Следует отметить, что симметричный синусоидальный режим уравновешен и сбалансирован, однако реально несбалансирован, если стандартная реактивная мощность не равна нулю.

Процедура компенсации тока нулевой последовательности исключает из цепи источника, как активную составляющую мгновенной мощности нулевой последовательности, так и векторную, обусловленную током нулевой последовательности. Эта процедура выполняется без задержки по времени, так как не требует интегрирования.

Для решения задачи компенсации достаточно знание суммарной величины неактивных составляющих полной мощности (величины неактивной мощности) без ее детализации. Создание методологии измерения и учета потребует знания величин каждой неактивной составляющей отдельно, что приводит к необходимости развития единого подхода к измерению и компенсации неактивных составляющих полной мощности и разработки обобщенной теории мощности. Только в 3-проводной системе с симметричным напряжением устранение пульсаций и симметризация проводимостей фаз эквивалентные задачи (мощность пульсаций и мощность несимметрии проводимостей фаз равны). При несимметричном напряжении эти мощности разные, их анализ для электротехнических систем требует создания математической модели энергетических процессов несимметричных режимов 3-фазных систем.

Несимметричные нагрузки, которые кроме дополнительных потерь, приводят к несимметрии напряжения и пульсации потока энергии, наносят электроснабжению существенно больший вред, чем симметрия реактивных проводимостей фаз (реактивная мощность).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сокол Е.И., Гриб О.Г., Швець С.В. Структурно-параметрическая организация элементов энергосистемы в условиях сетецентризма // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2016. – №2. – С. 61-64. doi: 10.20998/2074-272X.2016.2.11.
2. Сокол Е.И., Гриб О.Г., Швець С.В. Сетевые технологии оптимизации оперативного обслуживания элементов энергосистемы // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2016. – №3. – С. 67-72. doi: 10.20998/2074-272X.2016.3.11.
3. Швець С.В., Воропай В.Г. Мережецентричні аспекти використання безпілотних літальних апаратів // *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Серія «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України»*. – 2016. – №176. – С. 33-34.

4. Денисюк С.П. Оптимизация электропотребления для энергосбережения в системах с преобразователями // Проблемы энергосбережения. – 1994. – №2, 3. – С. 81-88.
5. Праховник А. В. Энергосбережения: нетрадиционный взгляд та інша стратегія // Энергетика та електрифікація. – 2008. – №4. – С. 30-33.
6. Шидловский А.К., Кузнецов В.Г. Повышение качества электроэнергии в электрических сетях. – Киев: Наукова думка, 1985. – 286 с.
7. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Вопросы качества электроэнергии в электроустановках. – Мариуполь, ПГТУ. – 1996. – 173 с.
8. Tenti P., Mattavelli P., Tedeschi E. Compensation techniques based on reactive power conservation // 7th Int. Workshop on Power Definitions and Measurements under Non-Sinusoidal Conditions. – Cagliari, Italy. – July 2006. – pp. 84-90.
9. Сиротин Ю.А. Ток небаланса и ток пульсаций при несимметричном напряжении // Технічна електродинаміка. – 2012. – №2. – С. 42-43.

REFERENCES

1. Sokol Y.I., Gryb O.G., Shvets S.V. The structural and parametrical organization of elements of a power supply system in the conditions of network centrism. *Electrical engineering & electromechanics*, 2016, no.2, pp. 61-64. (Rus). doi: **10.20998/2074-272X.2016.2.11**.
2. Sokol Y.I., Gryb O.G., Shvets S.V. Network centrism optimization of expeditious service of elements of the power supply system. *Electrical engineering & electromechanics*, 2016, no.3, pp. 67-72. (Rus). doi: **10.20998/2074-272X.2016.3.11**.
3. Shvets S.V., Voropai U. G. Mariechantal aspects of the use of unmanned aerial vehicles. *Bulletin of Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture*, 2016, no.176, pp. 33-34. (Ukr).
4. Denisyuk S.P. Optimization of power consumption for energy saving in systems with converters. *Problems of energy saving*, 1994, no.2-3, pp. 81-88. (Rus).
5. Prakhovnik A.V. Energy saving: unconventional look and a different strategy. *Energetic and electrification*, 2008, no.4, pp. 30-33. (Rus).
6. Shidlovsky A.K., Kuznetsov V.G. *Povyshenie kachestva elektroenergii v elektricheskikh setiakh* [Increase the power quality in electric networks]. Kyiv, Naukova Dumka Publ., 1985. 286 p. (Rus).
7. Zhezhelenko I.V., Saenko Yu.L. *Voprosy kachestva elektroenergii v elektroustanovkakh* [Issues of power quality in electrical installations]. Mariupol, PSTU Publ., 1996. 173 p. (Rus).
8. Tenti P., Mattavelli P., Tedeschi E. Compensation techniques based on reactive power conservation. *7th Int. Workshop on Power Definitions and Measurements under Non-Sinusoidal Conditions*, Cagliari, Italy, July 2006, pp. 84-90.
9. Sirotnin Yu.A. Unbalanced current and the pulsating current at asymmetrical voltage. *Tekhnichna elektrodynamika*, 2012, no.2, pp. 42-43.

Поступила (received) 25.04.2017

Сокол Евгений Иванович¹, д.т.н., проф., член-корр. НАНУ,
Сиротин Юрий Александрович¹, д.т.н., проф.,
Иерусалимова Татьяна Сергеевна¹, к.т.н.,
Гриб Олег Герасимович¹, д.т.н., проф.,
Швец Сергей Викторович¹, к.т.н. доц.,
Гапон Дмитрий Анатольевич¹, к.т.н. доц.,
¹Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
61002, Харьков, ул. Кирпичева, 2,
тел/phone +38 057 7076551,
e-mail: Ierusalimovat@mail.ru, dima12345ml@mail.ru,
se_sx@bk.ru

Y.I. Sokol¹, Yu.A. Sirotnin¹, T.S. Ierusalimova¹, O.G. Gryb¹,
S.V. Shvets¹, D.A. Gapon¹

¹National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
2, Kurpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Network-centric technologies for control of three-phase network operation modes.

Purpose. The development of the control system for three-phase network is based on intelligent technologies of network-centric control of heterogeneous objects. The introduction of unmanned aerial vehicles for monitoring of three-phase network increases the efficiency of management. **Methodology.** The case of decomposition of the instantaneous capacities of the fixed and variable components for 3-wire system. The features of power balance for the different modes of its functioning. It should be noted that symmetric sinusoidal mode is balanced and good, but really unbalanced, if the standard reactive power is not zero. To solve the problem of compensation is sufficient knowledge of the total value of the inactive components of full power (value of the inactive power) without detail. The creation of a methodology of measurement and assessment will require knowledge of the magnitudes of each inactive component separately, which leads to the development of a unified approach to the measurement and compensation of inactive components of full power and the development of a generalized theory of power. **Results.** Procedure for the compensation of the current of zero sequence excludes from circuit the source, as the active component of instantaneous power of zero sequence, and a vector due to a current of zero sequence. This procedure is performed without time delay as it does not require integration. Only a 3-wire system with symmetrical voltage eliminates pulsations and symmetrization of the equivalent conductances of the phases of the task. Under asymmetric voltage, the power is different, its analysis requires the creation of a vector mathematical model of the energy processes of asymmetrical modes of 3-phase systems. **Originality.** The proposed method extends the basis of the vector method for any zero sequence voltages and shows that the various theories of instantaneous power three wired scheme due to the choice of a basis in a two-dimensional subspace. **Practical value.** The algorithm and software implementation for the decomposition of the zero sequence current, which allocated the procedure of obtaining null-balanced vectors of phase and interfacial voltage, calculation of active and inactive instantaneous power is zero balanced mode. The simulation results obtained in the software package Matlab by the method of visual programming in Simulink. References 9, figures 5.

Key words: network-centric control, unmanned aerial vehicle, losses, quality, monitoring, instantaneous power.