

**SYSTEM FOR BALANCING OPERATING MODES OF THREE-PHASE  
FOUR-CURRENT ELECTRICAL NETWORK OF ADMINISTRATIVE BUILDING  
WITH A KINETIC ENERGY STORAGE**

**Savchenko N.A.**, senior lecturer,  
**Tretjak A.V.**, senior lecturer,  
*Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*  
natali\_a\_savchenko@ukr.net

**Shevchenko S.Yu.**, Doctor of Engineering, Professor,  
*National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»*  
syurik42@gmail.com

**Abstract.** The purpose of the article is to develop a balancing device with a kinetic energy storage for the power supply system of the administrative building, which will lead to an improvement of the quality of electricity in low voltage electrical networks and the normal functioning of electrical equipment. Methodology. To conduct research, the theory of designing internal electrical networks of buildings, the theory of methods and means for balancing the operating modes of electrical networks and the theory of methods for improving the quality of electrical energy were used. Results. The methods and means for balancing the voltage and phase load are investigated. Based on the analysis, the structure of the balancing system with KES for the power supply system of the administrative building was developed. Scientific novelty. For the first time, the application of the kinetic energy storage in the balancing device for the power supply system of the building is considered, which makes it possible to improve the quality and reliability of the 0.4 kV electric network as a whole. The developed balancing device performs the balancing in two ways: the way of cyclic switching and the method of conversion and recovery. A distinctive feature of the developed device is the absence of a break in the electrical circuit at the time of load balancing and, accordingly, the absence of transient processes. Practical significance. The application of the proposed scheme will improve the energy efficiency and quality of electrical energy in the power supply system of the building and will ensure trouble-free operation of electric receivers. The parameters of the KES and associated equipment should be selected from the assumed size of the building's asymmetry, the need to use the building as a regulator consumer, and the need for an autonomous power supply to the building. Also, when installing alternative power sources (solar panels, etc.) in the building, their energy can be stored in the KES, and, if necessary, used to increase the reliability of the power supply to the building.

**Key words:** power supply system, kinetic energy storage (KES), voltage asymmetry, current asymmetry, load balancing system.

**Введение.** Схема распределения электроэнергии в здании зависит от напряжения сети; уровня электрических нагрузок; надежности электроснабжения; экономичности; простоты и удобства эксплуатации, а также конструктивных особенностей здания [1].

Схема электросети здания должна обеспечивать правильное функционирование как сети в целом, так и отдельных ее звеньев в нормальном и аварийном режимах и, в частности, гарантировать соответствующий уровень напряжения на зажимах электроприемников. При этом имеется в виду, что качественные параметры самой электроэнергии, зависящие от энергосистемы, поддерживаются последней в должных пределах [1].

Широкое применение в коммунально-бытовом секторе устройств с нелинейными вольт-амперными характеристиками из-за одновременного изменения графиков нагрузки и неравномерного распределения однофазных потребителей по фазам приводит к нарушению допустимых значений показателей качества электроэнергии в электрических сетях напряжением 0,4 кВ и соответственно энергосистемы в целом [2].

Перекас фаз (напряжений) и перекас фазных нагрузок является на данный момент

серьезной проблемой в сетях напряжением 0,4 кВ. Даже незначительное снижение перекося фаз (напряжений) и перекося фазных нагрузок в системе электроснабжения здания приводит к существенной экономии электроэнергии и повышению ее качества. Поэтому задача разработки методов и устройств симметрирования напряжений и нагрузки в электроэнергетической трехфазной четырехпроводной системе является актуальной, так как существенно снижает расход электроэнергии и повышает надежность работы электроприемников коммунально-бытовых потребителей.

**Целью работы** является разработка структуры системы симметрирования нагрузки с кинетическим энергонакопителем для системы электроснабжения административного здания, с целью улучшения качества функционирования внутренних электрических сетей напряжением 0,4 кВ.

**Анализ методов и способов симметрирования в сети 0,4 кВ.** Явление перекося фаз или несимметрии напряжений наиболее часто проявляется в трехфазных четырех- (пяти-) проводных сетях с глухозаземленной нейтралью напряжением до 1000 В и это связано с неравномерностью распределения нагрузок по фазам или с включением в трехфазную сеть мощных однофазных нагрузок [3].

Применение тех или иных методов симметрирования связано с видами несимметрии. Различают два вида несимметрии: систематическую и вероятностную, или случайную. Систематическая несимметрия обусловлена неравномерной постоянной перегрузкой одной из фаз, вероятностная несимметрия соответствует непостоянным нагрузкам, при которых в разное время перегружаются разные фазы в зависимости от случайных факторов [4].

Причиной систематической несимметрии в трехфазных четырех- (пяти-) проводных сетях напряжением до 1000 В является неправильное распределение нагрузки по фазам и основным методом симметрирования в данном случае является правильный расчет нагрузки и повторное перераспределение нагрузки в соответствии с выполненными расчетами. Этот же метод используется в случае маломощной осветительной нагрузки. Также для устранения несимметрии возможно повышение сечения проводов и значения мощности питающих трансформаторов или уменьшение сопротивления нулевого провода в четырехпроводных цепях.

В случае вероятностной несимметрии основным методом симметрирования является применение различных устройств симметрирования по большей части управляемых автоматически, которые быстро реагируют и устраняют возникшую несимметрию.

Конструкции известных устройств симметрирования выполнены в зависимости от способа симметрирования. В настоящее время существует три эффективных способа симметрирования:

1. Способ преобразования и рекуперации электроэнергии, основанный на применении различного вида электрических машин постоянного и переменного тока.
2. Способ циклической коммутации с помощью различного вида реле и переключателей.
3. Способ компенсации и фильтрации, реализуемый с помощью симметрирующих трансформаторов или электрических схем, выполненных с определенным соединением групп реактивных элементов (катушек индуктивности или конденсаторов).

Симметрирующие устройства, построенные по способу преобразования и рекуперации энергии до настоящего времени не распространены и практически не имеют реализации из-за необходимости использования электрических машин с высокой номинальной мощностью и высокой стоимостью дополнительного оборудования, а также из-за больших потерь электроэнергии при таком способе реализации.

Самыми простыми в реализации являются устройства, построенные по способу циклической коммутации [5], но основной их недостаток – это возникновение переходных процессов в период переброса нагрузки между фазами с помощью контактов реле или силовых ключей.

Наибольшее количество разработок и исследований выполнено по созданию

симметрирующих устройств, основанных на способе компенсации.

Известны устройства симметрирования, построенные по принципу стабилизации напряжения в фазах с применением трехстержневого трансформатора, они подробно рассмотрены в работах В.Д. Василенко и А.Н. Евсеева [6-8]. Основным их недостатком является сложность и большая установленная мощность симметрирующего трансформатора.

Регулируемые симметрирующие устройства построенные по способу фильтрации рассмотрены в работах С.А. Сидорова [3], П.С. Орлова и др. [9]. Недостатком таких устройств также является наличие переходных процессов в начале процесса симметрирования.

С развитием технических идей относительно применения кинетических энергонакопителей в различных областях энергетики рассмотрена возможность использования их при подключении в систему электроснабжения здания как для регулирования (выравнивания) графика нагрузки здания, так и для симметрирования нагрузки внутри здания.

**Анализ несимметричности системы электроснабжения здания.** Объектом исследования является система электроснабжения учебного корпуса ДонНАБА, который выступает в роли потребителя – регулятора, описанного в [10]. Основными потребителями корпуса являются в основном однофазные потребители (освещение, бытовые приборы, вычислительная техника), а также незначительное количество трехфазных потребителей (электрические печи и лабораторное оборудование). Система электроснабжения здания – трехфазная четырехпроводная напряжением 0,4 кВ.

Для определения метода и способа симметрирования нагрузки исследуемого объекта проведен анализ схемы пофазного подключения потребителей, а также их номинальные технические характеристики и их нагрузочную способность.

Анализ несимметричности нагрузки здания выполнен на основе замеров пофазно электрической нагрузки и напряжения в случайном порядке в разное время суток в течении месяца. Результаты замеров приведены в таблице 1.

Согласно данным в таблице 1 определяем наличие вероятностной несимметрии в системе электроснабжения потребителя – регулятора, которая выражается в случайных перекосах напряжений фаз и нагрузок, следовательно, для симметрирования нагрузки и напряжения фаз необходимо разработать симметрирующее устройство, позволяющее симметрировать нагрузку пофазно.

Таблица 1 – Анализ несимметричности нагрузки

| Дата замера | Время замера, ч | Фаза А    |           | Фаза В    |           | Фаза С    |           |
|-------------|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|             |                 | $I_{A,A}$ | $U_{A,B}$ | $I_{B,A}$ | $U_{B,B}$ | $I_{C,A}$ | $U_{C,B}$ |
| 20.10.17    | 8.00            | 22,1      | 225       | 30,5      | 216       | 13,7      | 237       |
| 20.10.17    | 11.00           | 35,1      | 206       | 18,8      | 224       | 31,5      | 230       |
| 20.10.17    | 15.00           | 29,7      | 209       | 22,8      | 214       | 4,3       | 241       |
| 25.10.17    | 8.00            | 22,3      | 213       | 12,5      | 233       | 20,4      | 227       |
| 25.10.17    | 10.00           | 22,1      | 223       | 37,8      | 210       | 22,3      | 224       |
| 25.10.17    | 13.00           | 22,8      | 228       | 26,2      | 209       | 15,6      | 227       |
| 03.11.17    | 8.00            | 4,5       | 242       | 5,0       | 229       | 4,3       | 244       |
| 03.11.17    | 12.00           | 5,7       | 237       | 7,6       | 223       | 3,9       | 242       |
| 10.11.17    | 10.00           | 19,5      | 230       | 9,2       | 232       | 20        | 239       |
| 10.11.17    | 14.00           | 16,3      | 223       | 22,2      | 229       | 3,4       | 249       |
| 15.11.17    | 7.00            | 24,1      | 220       | 5,7       | 235       | 15,6      | 238       |
| 15.11.17    | 13.00           | 5,4       | 227       | 16,2      | 216       | 12        | 230       |

Перечень показателей качества электрической энергии определен в ГОСТ 13109-97. Применительно к исследуемому объекту для определения целесообразности создания и

применения системы симметрирования выполнен расчет следующих показателей [11]:

1) отклонение частоты  $\Delta f$ , Гц:

$$\Delta f = f - f_{ном}, \text{ Гц} \quad (1)$$

2) установившееся отклонение напряжения  $\delta U_y$ , %:

$$\delta U_y = \frac{U - U_{н.сети}}{U_{н.сети}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

3) размах изменения напряжения  $\delta U_t$ , %:

$$\delta U_t = \frac{|U_i - U_{i+1}|}{U_{н.сети}} \cdot 100\%, \quad (3)$$

Расчет произведен для замеров, выполненных на протяжении одного рабочего дня, результаты расчета сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Показатели качества электроэнергии

| Дата замера | Время замера, ч | $f_{ном}$ , Гц | Фаза А    |                  |                  | Фаза В    |                  |                  | Фаза С    |                  |                  |
|-------------|-----------------|----------------|-----------|------------------|------------------|-----------|------------------|------------------|-----------|------------------|------------------|
|             |                 |                | $U_A$ , В | $\delta U_y$ , % | $\delta U_t$ , % | $U_B$ , В | $\delta U_y$ , % | $\delta U_t$ , % | $U_C$ , В | $\delta U_y$ , % | $\delta U_t$ , % |
| 13.12.17    | 8.00            | 50             | 220       | 0                | -                | 237       | 7,23             | -                | 235       | 6,82             | -                |
| 13.12.17    | 9.00            | 50             | 232       | 5,45             | 5,45             | 222       | 0,91             | 6,82             | 227       | 3,18             | 3,64             |
| 13.12.17    | 10.00           | 50             | 236       | 7,27             | 1,82             | 225       | 2,27             | 1,36             | 225       | 2,27             | 0,91             |
| 13.12.17    | 11.00           | 50             | 242       | 10,00            | 2,73             | 223       | 1,36             | 0,91             | 229       | 4,09             | 1,82             |
| 13.12.17    | 12.00           | 50             | 243       | 10,45            | 0,45             | 223       | 1,36             | 0                | 237       | 7,23             | 3,64             |
| 13.12.17    | 13.00           | 50             | 238       | 8,18             | 2,27             | 224       | 1,82             | 0,45             | 244       | 10,91            | 3,18             |
| 13.12.17    | 14.00           | 50             | 238       | 8,18             | 0                | 237       | 7,23             | 5,91             | 234       | 6,36             | 4,55             |
| 13.12.17    | 15.00           | 50             | 234       | 6,36             | 1,82             | 228       | 3,64             | 4,09             | 236       | 7,27             | 0,91             |
| 13.12.17    | 16.00           | 50             | 225       | 2,27             | 4,09             | 228       | 3,64             | 0                | 230       | 4,54             | 2,73             |

Согласно ГОСТ 13109-97 отклонение напряжения  $\delta U_y$  в пределах  $\pm 5\%$  является нормально допустимым, а в пределах  $\pm 10\%$  предельно допустимым значением. Размах напряжения  $\delta U_t$  в пределах  $\pm 8\%$  является предельно допустимым.

Анализ данных таблицы 2 показывает наличие отклонения напряжения выше установленных норм, следовательно, необходимо разработать систему симметрирования нагрузки здания.

**Система симметрирования с кинетическим накопителем энергии.** В систему электроснабжения административного здания подключен КЭН с целью регулирования нагрузки, который может быть использован и для симметрирования нагрузки.

Структурная схема симметрирующего устройства на основе КЭН приведена на рис. 1. Работает схема следующим образом: здание – потребитель подключено к трехфазной городской сети. В период минимальной нагрузки здания (ночное время) происходит максимальная зарядка КЭН [1]. При увеличении нагрузки в здании (дневное время) и появлении асимметрии токов в фазах, которые контролируются датчиками тока ДТ установленными на питающей линии здания, блок управления БУ подает сигнал на запуск grid-tie инвертора И, который начинает формировать синусоидальное напряжение синхронно с заданной блоком управления фазой сети, подпитывая её. За счет этого снижается потребление энергии этой фазой из сети, происходит выравнивание токов в фазах подводящей линии. Необходимая для выравнивания мощность отбирается из КЭН посредством генератора Г.

При длительной асимметрии нагрузки в здании, происходит значительная разрядка накопителя, уровень которой контролируется энкодером Э. В этом случае происходит запуск преобразователя частоты ПЧ и подпитка КЭН [1]. Для уменьшения отбираемой мощности из накопителя в процессе его зарядки, последняя происходит только от недогруженных фаз. Это обеспечивается симисторами VS 1-3. Сигнал на открывание, который подается из БУ. Симметрирующей, в данный момент, является нагрузка зарядки накопителя, догружая малонагруженные фазы. Уровень этой нагрузки регулируется блоком управления БУ, благодаря этому снижается или вообще прекращается отбор мощности из КЭН.

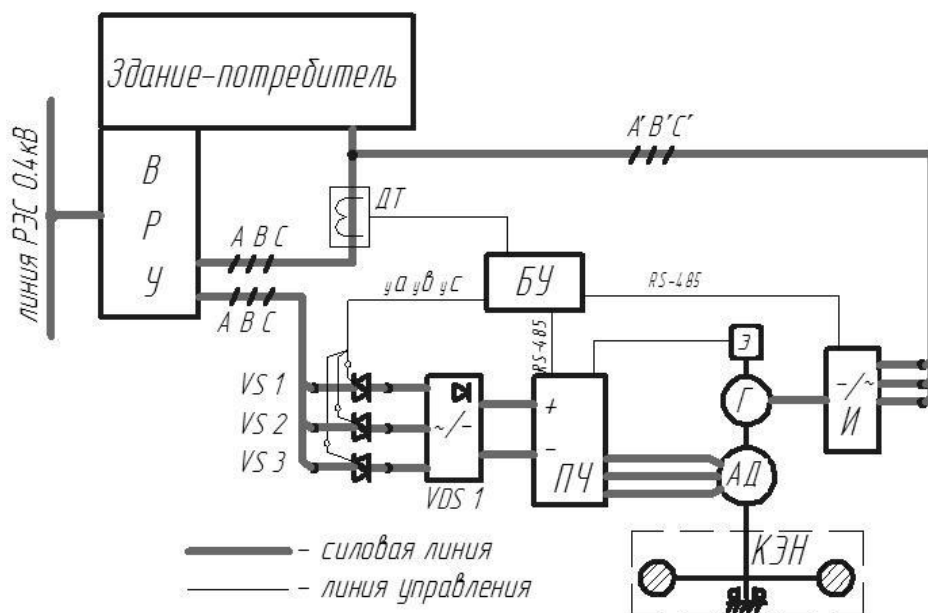


Рис. 1. Структурная схема разработанного устройства симметрирования:

VS 1-3 – симисторы, VDS 1 – трехфазный диодный мост, ПЧ – преобразователь частоты, АД – асинхронный электродвигатель, Г – генератор, Э – инкрементальный энкодер, КЭН – кинетический энергонакопитель, И – grid-tie инвертор, ДТ – датчики тока, БУ – микроконтроллерный блок управления, ВРУ – вводно-распределительное устройство здания

При необходимости сгладить пик нагрузки здания инвертор И формирует синхронно питающей сети напряжение всех трех фаз, подпитывая их. В этом случае здание выступает в качестве потребителя-регулятора [1]. При установке в здании альтернативных источников питания (солнечные панели и т.д.), их энергию можно аккумулировать в КЭН, а по необходимости использовать ее для электроснабжения здания. Это избавит от заключения дополнительных договоров с РЭС и обеспечит бесперебойное питание здания в аварийной ситуации.

Параметры КЭН и сопутствующего оборудования следует выбирать из предполагаемой величины асимметрии нагрузки здания, необходимости использования здания в качестве потребителя-регулятора, необходимости автономного питания здания. Также следует отметить, что применение данного метода симметрирования сохраняет качество электроэнергии в здании за счет отсутствия разрывов фазы при включении grid-tie инвертора и низком коэффициенте гармоник (порядка 2%) в отличие от метода компенсации и фильтрации.

#### Выводы и перспективы дальнейших исследований:

1. Выполнен анализ методов и способов симметрирования напряжения и нагрузки фаз. На основе анализа определен способ симметрирования для разработки симметрирующего устройства для трехфазной сети напряжением 0,4 кВ для системы электроснабжения административного здания.

2. Выполнен анализ несимметричности нагрузки и напряжения фаз системы

електроснабження учебного корпуса ДонНАБА, что позволило определить вид несимметрии и необходимость выполнения симметрирования.

3. Разработана структурная схема симметрирующего устройства на основе КЭН, встроенного в систему электроснабжения здания.

Разработанное устройство симметрирования выполняет симметрирование двумя способами: способом циклической коммутации и способом преобразования и рекуперации. Отличительной особенностью разработанного устройства является отсутствие разрыва электрической цепи в момент симметрирования нагрузки и, соответственно, отсутствие переходных процессов. Также при установке в здании альтернативных источников питания (солнечные панели и т.д.), их энергию можно аккумулировать в КЭН, а по необходимости использовать ее для электроснабжения здания.

### Литература

1. Якубчик П.П. Справочник по инженерному оборудованию жилых и общественных зданий / П. П. Якубчик, А. Е. Татура, Н. А. Черников, О. А. Продоус; под ред. В. С. Дикаревского. – К.: Будивельник, 1989. – 360 с.
2. Арутюнян А.Г. Анализ режимов работы трехфазных четырехпроводных электрических сетей статистическим методом расчета нагрузок / А.Г. Арутюнян // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2011. – №6. – С. 45-55.
3. Сидоров С.А. Система симметрирования электромагнитных параметров при однофазной переменной нагрузке / С.А. Сидоров, Л.Э. Рогинская // Вестник московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. – 2015. – №4(103). – С.96-105.
4. <http://electricalschool.info/main/elsnabg/468-prichiny-vozniknovenija.html>.
5. Патент РФ, RU2015146070U Устройство симметрирования нагрузки / А.И. Орлов, А.А. Савельев; патент RU162639U1, заявка от 26.10.2015, опубл. 20.06.2016.
6. Патент РФ, МПК H02J3/26 Трехфазное симметрирующее устройство / В.Д. Василенко; патент РФ № 2521864, заявка от 03.07.12, опубл. 10.07. 2014.
7. Патент РФ, МПК H02J3/26 Трехфазное симметрирующее устройство/ В.Д. Василенко; патент РФ № 2453965, заявка от 23.09.10, опубл. 20.06. 2012.
8. Патент РФ, МПК H02J3/26 Устройство равномерного распределения однофазной нагрузки по фазам трехфазной сети / А.Н. Евсеев; патент РФ № 2591040, заявка от 26.05.15, опубл. 10.07. 2016.
9. Орлов П.С. Аспекты эффективности и безопасности при несимметричной нагрузке в электросетях / П.С. Орлов, В.С. Шкрабак, Л.А. Голдобина, Р.В. Шкрабак, С.П. Кочкин, О.В. Худяев // Аграрный научный журнал. – 2017. – № 4. – С. 62-69.
10. Shevchenko S. Yu. Managing the load schedule of the administrative building taking into account emerging risks when connecting the kinetic energy storage to the power supply system/ Yu. Shevchenko, N. A. Savchenko, A. V. Tretjak. // Електротехніка і електромеханіка. – 2017. – №6. – С. 69-73.
11. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Изд-во стандартов, 1997. – 32 с.

Стаття надійшла 28.02.2018