

И.В. ПЕНТЕГОВ, д-р техн. наук,
И.В. ВОЛКОВ, д-р техн. наук, чл.-корр. НАНУ,
В.М. БЕЗРУЧКО, аспирант,
С.В. РЫМАР, канд. техн. наук,
Г.С. КРИВЕНКО, инж.,
В.П. КАБАН, канд. техн. наук,
В.Ю. МАТВЕЕВ, канд. техн. наук

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ТРЕХФАЗНО-ДВУХФАЗНОГО ФИЛЬТРА ТОКОВ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Рассматриваются особенности работы трехфазно-двухфазного фильтра токов нулевой последовательности, асимметричного автотрансформаторного фильтра новой конструкции с заменой одной из фазных обмоток открытым треугольником и описываются процессы, происходящие в нем.

Розглядаються особливості роботи трифазно-двофазного фільтра струму нульової послідовності, асиметричного автотрансформаторного фільтра нової конструкції з заміною однієї з фазних обмоток відкритим трикутником та описуються процеси, що відбуваються в ньому.

Введение. Последние десятилетие в сети 0,4 кВ появилось много нелинейных нагрузок. Это офисная техника, работающая с импульсными источниками питания. Как пример можно привести компьютеры, мониторы, принтеры, ксероксы и т.д. Нелинейные нагрузки потребляют несинусоидальный ток, и это, наряду с не симметрией нагрузок, приводит к появлению больших токов в нейтральном проводе питающей сети. Особенно это критично для административных и офисных зданий, так как основная часть нагрузок в них нелинейная. На практике известны случаи, когда действующее значение тока нейтрали распределительной сети превышало фазные значения токов в 1,5 и более раза [1]. Негативные воздействия высоких уровней тока нулевой последовательности (ТНП) описаны в работах [1, 2].

Устройства фильтрации ТНП в трехфазных сетях с нулевым проводом называются фильтрами токов нулевой последовательности (ФТНП) [3], фазо-компенсирующими, шунтовыми симметрирующими устройствами (ФКУ, ШСУ) [4, 5], или Zero-фильтрами. Большой вклад в разработку ФКУ и ШСУ в СССР и Украине внесли ученые Института электродинамики НАН Украины А.К. Шидловский и В.Г. Кузнецов.

До 70-80 г. XX века ФТНП типа "автотрансформаторный зигзаг" использовались в основном для симметрирования напряжения и тока в фазах при несимметричном распределении однофазных нагрузок. Расчет ФТНП производился для токов первой гармоники.

Интерес к ФТНП в последнее время заметно вырос в связи с появлением в крупных административных зданиях большого количества нелинейных нагрузок.

зок, которые даже при равномерном распределении нагрузок по фазам сети загружают нейтральные провода сети гармониками тока, кратными трем. При этом нагрузка нейтрального провода может превосходить в два раза нагрузку фазных проводов. При применении ФТНП для борьбы с высшими гармониками тока требования, предъявляемые к ним, должны быть иными. Статья посвящена исследованию особенностей работы нового класса ФТНП, так называемых "трехфазно-двухфазных" фильтров.

Сопротивление токам нулевой последовательности. Основной характеристикой ФТНП является сопротивление ТНП. Обычно оно рассчитывается и измеряется только для основной частоты (первой гармоники). Данный подход не даёт информации о характеристиках ФТНП для высших гармоник, поскольку их частота отличается от основной частоты в h раз (h – номер гармоники), а значит и сопротивление ТНП будет другим. Поэтому важно знать не только полное сопротивление ТНП, но и значения его активной и реактивной составляющих. Это даёт возможность прогнозирования качества фильтрации ТНП той или иной гармоники.

Определение сопротивления ТНП в ФТНП обычно производится из опыта КЗ по схеме, представленной на рис. 1. Все фазные клеммы фильтра соединяются вместе и он подключается к источнику переменного напряжения 50 Гц, как правило, через балластное сопротивление. Измеренные значения напряжения $U_{опыт}$ на клеммах ФТНП и ток в нейтрали схемы $I_{опыт}$ позволяют определить полное комплексное сопротивление ТНП $Z_{ФТНП}^0 = U_{опыт}/I_{опыт}$, или, в относительных единицах, $Z_{ФТНП}^0 = Z_{ФТНП}^0/Z_б$, где базовое сопротивление $Z_б = U_{ном}/(3I_{ном})$; $I_{ном}$, $U_{ном}$ – номинальные значения фазного тока и напряжения фильтра. Иногда под полным сопротивлением ТНП понимают величину $Z_{ФТНП}^0 = U_{опыт}/(I_{опыт}/3)$, где $(I_{опыт}/3)$ – ток фазы в эксперименте, а под $Z_б$ величину $Z_б = U_{ном}/I_{ном}$. При этом величина $Z_{ФТНП}^0$ не изменяется. Желательно, чтобы в опыте КЗ ток $I_{опыт}$ был соизмерим с номинальным током нейтрали I_N или равен ему.

Следует заметить, что при использовании, в качестве измерительных элементов, амперметра и вольтметра в схеме рис. 1 можно найти лишь $|Z_{ФТНП}^0|$. Для нахождения комплексного значения сопротивления необходимо использовать в качестве измерительных устройств более дорогостоящие оборудование, которое позволит измерять не только величины токов и напряжений, но и фазовый сдвиг между ними.

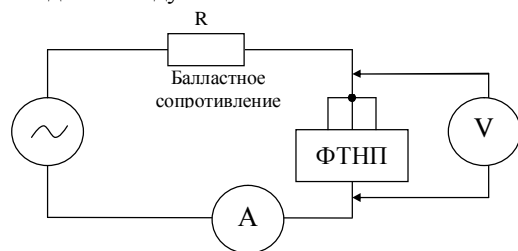


Рис. 1. Схема для определения сопротивления ТНП.

Величина сопротивления $Z_{\text{ФТНП}}^0$ не позволяет прогнозировать величину тока, которая будет отбираться фильтром из нейтрального провода в той или иной сети или месте подключения ФТНП, так как эта величина зависит от отношения $Z_{\text{ФТНП}}^0$ к величине сопротивления ТНП $Z_{\text{Тр}}^0$ трансформатора, с которым работает ФТНП. Однако после выделения активной и реактивной составляющих

$$Z_{\text{ФТНП}}^0 = \text{Re}(Z_{\text{ФТНП}}^0) + j \cdot \text{Im}(Z_{\text{ФТНП}}^0),$$

она дает возможность узнать, что при достижении номинального тока относительное искажение напряжения нулевой последовательности (ННП) на зажимах фильтра для h -й гармоники (h кратно 3) не будет выше значения

$$Z_{\text{ФТНП}}^0 = \text{Re}(Z_{\text{ФТНП}}^0) + j \cdot \text{Im}(Z_{\text{ФТНП}}^0)h.$$

Использование данной величины на практике удобно, поскольку позволяет оценивать качество напряжения после установки ФТНП в сеть.

Особенность ФТНП заключается в том, что необходимо обеспечить как можно меньшее значение индуктивной составляющей, даже за счет некоторого роста активной составляющей, поскольку индуктивная составляющая влияет в h раз сильнее на сопротивление ТНП, чем активная составляющая, и для высоких номеров гармоник является определяющей.

При расчетах конструкции ФТНП особо важна возможность прогнозирования сопротивления ТНП. Однако для рассматриваемого фильтра это вызывает сложности из-за его асимметричности.

На рис. 2,а представлена схема трехфазно-двухфазного ФТНП новой конструкции [6-9], а на рис. 3,б – его векторная диаграмма напряжений на обмотках в рабочем режиме (при подключении к трехфазной сети с нулевым проводом).

Работа данного ФТНП основана на использовании трехстержневого магнитопровода с двумя катушками на крайних стержнях, на среднем стержне обмоток нет. Каждая катушка содержит две одинаковые обмотки, намотанные бифилярно со встречным (по отношению к токам нулевой последовательности) соединением обмоток. При этом [4]

$$\Phi_{0j} = 0; \quad \sum_{j=1}^n I_{0i,j} w_{i,j} = 0, \quad (1)$$

где Φ_{0j} – поток нулевой последовательности (НП) j -го стержня магнитопровода ФТНП ($j = 1, 2, \dots, n$); $w_{i,j}$ – количество витков i -ой обмотки, находящейся на j -м стержне; $I_{0i,j}$ – ТНП, протекающий в обмотке с количеством витков $w_{i,j}$.

В нашем случае $n = 3$, $w_{1,1} = w_{2,1} = w_{1,3} = w_{2,3} = w$, $w_{1,2} = w_{2,2} = 0$, $I_1 \gg I_3$, $I_3 \gg I_2$. Модули всех токов в обмотках практически одинаковы и равны I_0 и, как будет показано ниже, различие между ними не превышает 0.02%.

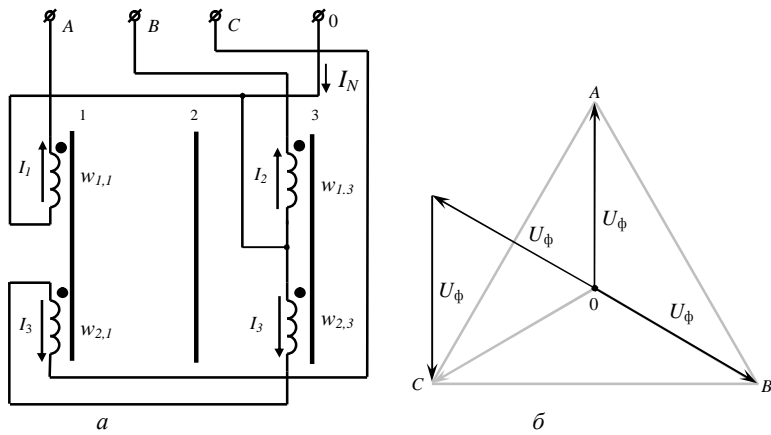


Рис. 2. Принципиальная схема соединения обмоток фильтра *a* и его векторная диаграмма напряжений *б*

Из формулы (1) следует, что для обмоток на каждом стержне должно выполняться требование, чтобы для ТНП алгебраическая сумма ампервитков всех обмоток на стержне равнялась нулю. При этом одинаковые ТНП в обмотках текут встречно и создают взаимно компенсирующие потоки в магнитопроводе. Это приводит к тому, что для ТНП фильтра индуктивное сопротивление мало. Для других последовательностей токов сопротивление велико.

Предложенная схема ФТНП является асимметричной, так как ток первой и второй фазы проходит через одну обмотку, а ток третьей фазы проходит через две обмотки.

Схема замещения ФТНП представлена на рис. 3,а. Для теоретического расчета сопротивления ТНП заменим схему на рис. 3,а на эквивалентную ей схему замещения на рис. 3,б. На данном рисунке ФТНП уже подключен согласно рис. 1 для измерения сопротивления НП в опыте КЗ. На рис. 3 даны обозначения: $L_{обм}$ – индуктивность одной из обмоток, обусловленная общим потоком в стержне магнитопровода для бифилярно намотанных обмоток; $r_{обм}$ – активное сопротивление обмотки; $M = L_{обм}$ – коэффициент взаимной индукции между обмотками на одном стержне при коэффициенте связи между обмотками к практически равном 1. $L_{биф}$ – индуктивность рассеяния обмотки, обусловленная потоком, который не замыкается по магнитопроводу и не является общим для бифилярно намотанных обмоток ($L_{биф} \ll L_{обм}$).

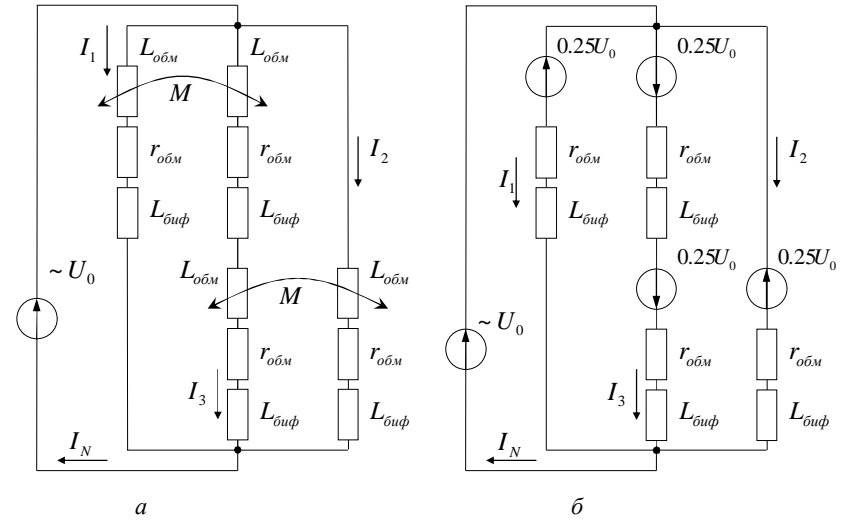


Рис. 3. Эквивалентные схемы замещения: а-полная, б-упрощенная

Составим систему уравнений для схемы на рис. 3,а:

$$\begin{cases} I_1[r_{обм} + j\omega(L_{обм} + L_{оуф})] - I_3(j\omega M) = U_0; \\ I_2[r_{обм} + j\omega(L_{обм} + L_{оуф})] - I_3(j\omega M) = U_0; \\ 2I_3[r_{обм} + j\omega(L_{обм} + L_{оуф})] - I_1(j\omega M) - I_2(j\omega M) = U_0; \\ I_1 + I_2 + I_3 = I_N. \end{cases} \quad (2)$$

При условии, что $M = L_{обм}$, после преобразования уравнения (2) получим:

$$\begin{cases} (I_1 - I_3) \cdot j\omega L_{обм} + I_1(r_{обм} + j\omega L_{оуф}) = U_0; \\ (I_2 - I_3) \cdot j\omega L_{обм} + I_2(r_{обм} + j\omega L_{оуф}) = U_0; \\ (I_1 - I_3 + I_2 - I_3) \cdot j\omega L_{обм} + 2I_3(r_{обм} + j\omega L_{оуф}) = U_0; \\ I_1 + I_2 + I_3 = I_N. \end{cases} \quad (3)$$

Из симметрии уравнений видно, что $I_1 = I_2$. Заменяем $I_1 - I_3 = I_2 - I_3 = \Delta I$. Система уравнений примет вид:

$$\begin{cases} \Delta I \cdot j\omega L_{обм} + (I_3 + \Delta I)(r_{обм} + j\omega L_{биф}) = U_0; \\ \Delta I \cdot j\omega L_{обм} + (I_3 + \Delta I)(r_{обм} + j\omega L_{биф}) = U_0; \\ -2\Delta I \cdot j\omega L_{обм} + 2I_3(r_{обм} + j\omega L_{биф}) = U_0; \\ I_1 + I_2 + I_3 = I_N. \end{cases} \quad (4)$$

При решении системы уравнений (4) относительно ΔI получим:

$$\Delta I = \frac{U_0}{2r_{обм} + j\omega(4L_{обм} + 2L_{биф})}, \quad (5)$$

при $L_{обм} \gg L_{биф}$ и $\omega L_{обм} \gg r_{обм}$ величина $\Delta I \cdot j\omega L_{обм} \approx 0,25U_0$. На практике эти индуктивности отличаются на 2...3 порядка, а добротность катушки с ферромагнитным сердечником всегда намного больше 1.

Таким образом, образуется упрощенная эквивалентная схема замещения на рис. 3,б, справедливая при указанных условиях. Из анализа схемы следует, что удвоенное падение напряжения на пассивных элементах ветви с током I_3 по сравнению с падением напряжения на пассивных элементах ветвей с токами I_1 и I_2 компенсируется тем, что в обмотках с током I_3 благодаря явлению взаимной индукции индуцируется э.д.с. $0,5U_0$, направленная согласно с приложенным напряжением U_0 , а в обмотках с токами I_1 и I_2 индуцируется э.д.с. $0,25U_0$, направленная встречно приложенному напряжению.

При решении системы уравнений (4) относительно I_3 получим:

$$I_3 = \frac{U_0}{4} \left[\frac{3}{r_{обм} + j\omega L_{биф}} - \frac{1}{r_{обм} + j\omega(2L_{обм} + L_{биф})} \right], \quad (6)$$

при $L_{обм} \gg L_{биф}$ и $\omega L_{обм} \gg r_{обм}$ величина $I_3 \cdot 2(r_{обм} + j\omega L_{биф}) \approx 1,5U_0$ и ток I_3 практически не отличается от токов I_1 и I_2 , равных $0,75 U_0 / (r_{обм} + j\omega L_{биф})$. В случае, когда $L_{обм} \gg L_{биф}$, значение тока ΔI очень мало по сравнению с токами $I_{1,2,3}$.

На рис. 4 представлена векторная диаграмма токов в обмотках ФТНП и показан принцип компенсации напряжения разбаланса $U_{разб}$. Величина напряжения разбаланса соизмерима с входным напряжением:

$$U_{разб}/3 = \Delta I \cdot j\omega L_{обм} = (1/4) U_0, \quad (7)$$

При этом направление вектора $U_{разб}$ совпадает с направлением вектора приложенного напряжения U_0 .

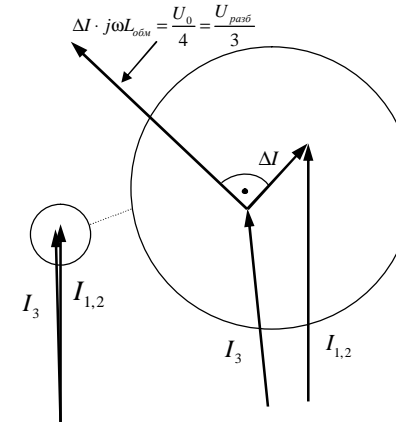


Рис. 4. Векторная диаграмма токов в обмотках.

На рис. 5 представлена векторная диаграмма напряжений на элементах в схеме замещения на рис. 3,а для случая, когда "длинная" фаза С выполнена проводником такого же поперечного сечения, что и фазы А и В. Из диаграммы виден принцип работы ФТНП и симметрирования сопротивлений в ветвях ФТНП.

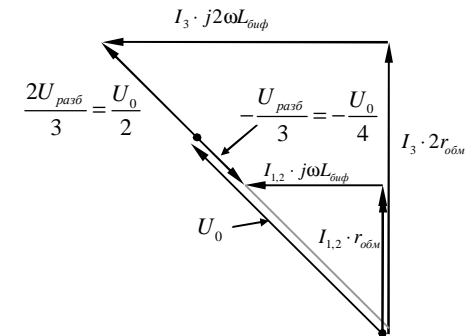


Рис. 5. Векторная диаграмма напряжений на элементах в схеме замещения, представленной на рис. 3,а.

Из формулы (6) можно показать, а из векторной диаграммы наглядно видно, что при $L_{обм} \gg L_{фиф}$ и $r_{обм} \ll \omega L_{обм}$ модуль полного сопротивления ФТНП фильтра равен:

$$|Z_{ФТНП}^0| = \frac{U_0}{I_{1eff} + I_{2eff} + I_{3eff}} = \frac{4}{9} \sqrt{r_{обм}^2 + (\omega L_{фиф})^2}, \quad (8)$$

где I_{123eff} – эффективные значения токов.

Оценим значение тока рассогласования ΔI . Введем обозначение $\Delta I/I_3 = \Delta I^*$ – это относительная безразмерная величина тока рассогласования.

Также учитывая то, что $I_1 = I_2 \approx I_3$, и используя уравнения (5) и (6), при $L_{обм} \gg L_{биф}$ и $r_{обм} \ll \omega L_{обм}$ получим:

$$\Delta I_* = \frac{1}{3} \cdot \frac{r_{обм} + j\omega L_{биф}}{j\omega L_{обм}} = \frac{L_{биф} - jr_{обм} / \omega}{3L_{обм}} \quad (9)$$

Для количественной оценки можно воспользоваться формулой:

$$|\Delta I_*| = \frac{1}{3} \cdot \frac{\sqrt{(r_{обм} / \omega)^2 + L_{биф}^2}}{L_{обм}} = \frac{3}{4} \frac{|Z_{ФТНП}^0|}{\omega L_{обм}} \quad (10)$$

Отметим, что такое же жесткое выравнивание токов гармоник НП происходит в процессе работы ФТНП в сети. Индуктивности $L_{обм}$ и $L_{биф}$ рассчитываются таким образом, чтобы при заданных параметрах питающего трансформатора отбирать из нейтрали 70-80 % тока нейтрали. Помимо этого рассмотренный ФТНП симметрирует фазные напряжения и устраняет несимметрию распределения нагрузок между фазами.

На рис. 6 помещена фотография разработанного ФТНП нового типа.

Этот ФТНП предназначен для работы с распределительным трансформатором на 1 МВт с соединением обмоток Y-Y₀ и током в нейтрали до 150 А и имеет следующие параметры: $L_{биф} = 0.038$ мГн, $L_{обм} = 260$ мГн, $r_{обм} = 18$ мОм, $|Z_{ФТНП}^0| = 22$ мОм, $|Z_{ФТНП}^*| = 1.5$ %, $|\Delta I_*| = 0.02$ %, $X_{ФТНП}^0 = m(Z_{ФТНП}^0) = 12$ мОм, $X_{ФТНП}^* = (X_{ФТНП}^0 / |Z_{ФТНП}^*|) \cdot |Z_{ФТНП}^*| \cdot 100$ % = 0,8 %. Масса устройства – 150 кг, габаритные размеры – 700 × 460 × 250 мм³.

Сравнение данного ФТНП с традиционным ФТНП, собранным по схеме "зигзаг" по установленной мощности не дает правильной оценки, так как конструкции разнотипны. Детальный же расчет оптимизированных вариантов этих двух типов ФТНП при одинаковых плотностях тока и магнитной индукции показывает, что эти ФТНП имеют практически одинаковые массогабаритные и стоимостные показатели. Однако, предложенный ФТНП допускает использование увеличенных плотностей тока (на 20 %) и магнитной индукции (на 10 %) благодаря лучшим условиям охлаждения обмоток и магнитопровода (отсутствуют обмотки на среднем стержне). При этом мы получаем выигрыш в массе активных материалов до 15 %, а выигрыш в стоимости – еще больше, так как вместо 3 катушек с обмотками здесь необходимо мотать всего 2 катушки.

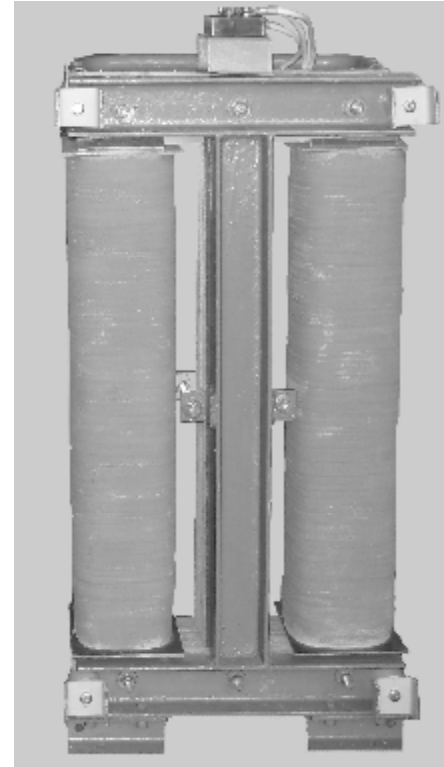


Рис. 6 Трехфазно-двухфазный ФТНП

Заключение. Описанные особенности работы трехфазно-двухфазного фильтра токов нулевой последовательности (асимметричного автотрансформаторного фильтра новой конструкции с заменой одной из фазных обмоток открытым треугольником) и доказанный принцип симметрирования сопротивлений в фазах позволяют проводить анализ работы фильтра на этапе его проектирования.

Выведена формула для расчета сопротивления ТНП фильтра и формула для оценки величины тока рассогласования в фазах.

Предложенный ФТНП имеет лучшие массогабаритные и стоимостные показатели по сравнению с традиционными ФТНП и может найти широкое применение в крупных административных зданиях для разгрузки нейтрали от токов НП и улучшения качества электроэнергии, потребляемой из сети.

Список литературы: 1. Капустин В.М., Лопухин А.А. Компьютеры и трехфазная электрическая сеть // Современные технологии автоматизации – СТА. – № 2. – 1997. – С. 104-108. 2. Климов В.П., Москалев А.Д. Проблемы высших гармоник в современных системах электропитания // Практическая силовая электроника. Науч.-техн. сб. / Под ред. Г.М. Малышкова, А.В. Лукина. – М.: АОЗТ "ММП-Ирбис", 2002. – Вып. 5. 3.

Шидловский А.К., Жаркин А.Ф. Вышние гармоники в низковольтных электрических сетях. – К.: Наук. думка, 2005. – 210 с. **4.** *Шидловский А.К., Кузнецов В.Г.* Повышение качества энергии в электрических сетях. – К.: Наук. думка, 1985. – 268 с. **5.** *Шидловский А.К., Новский В.А., Капличный Н.Н.* Стабилизация параметров электрической энергии в распределительных сетях. – К.: Наук. думка, 1989. – 312 с. **6.** Заявка на патент. 2007 01489 Украина. Трифазный фильтр гармоник струмів нульової послідовності автотрансформаторного типу / І.В. Пентегов, І.В. Волков та ін.; ЧДТУ (UA).– № 13545; Заявл. 20.02.2006. **7.** Заявка на патент. 2007 01508 Украина. Трифазный фильтр гармоник струмів нульової послідовності автотрансформаторного типу / І.В. Пентегов, І.В. Волков та ін.; ЧДТУ (UA).– № 13546; Заявл. 20.02.2006. **8.** Сравнительный анализ трехфазных фильтров токов нулевой последовательности автотрансформаторного и трансформаторного типа / И.В. Пентегов, С.В. Рымар та ін. // Технічна електродинаміка: Тем. випуск. Проблеми сучасної електротехніки. Ч. 3. – К.: ІЕД НАНУ, 2008. – С. 49-56. **9.** Результаты испытаний фильтра токов нулевой последовательности новой конструкции в административном здании / И.В. Пентегов, А.С. Письменный та ін. // Вісник Приазовського державного технічного університету. Зб. наук. пр. – Вип. 18. – Ч. 2, Енергетика. – Маріуполь, 2008. – С. 7-9.

Надійшла до редколегії 30.08.08