

НАДЕЖНОСТЬ ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ РАЗЛИЧНОЙ ТОПОЛОГИИ

V.O. Kolmakov

THE RELIABILITY OF FILTER-COMPENSATING DEVICES OF DIFFERENT TOPOLOGY

Колмаков В.О. – канд. техн. наук, доц. каф. систем обеспечения движения поездов Красноярского института железнодорожного транспорта – филиала Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Красноярск. E-mail: kolmakovvo@yandex.ru

Kolmakov V.O. – Cand. Techn. Sci., Chair of Systems of Ensuring Train Service, Krasnoyarsk Institute of Railway Transport, Branch of Irkutsk State University of Means of Communication, Krasnoyarsk. E-mail: kolmakovvo@yandex.ru

Современная структура электропотребления определяется расширяющейся нелинейной нагрузкой, характер которой определен алгоритмом функционирования источников вторичного электропитания. По этой причине энергоснабжающие организации столкнулись с серьезной проблемой «заражения» распределительных сетей высшими по отношению к промышленной частоте гармониками. Для снижения высших гармоник в случае неизменного нелинейного сопротивления нагрузки возможно применение фильтрокомпенсирующих устройств на основе пассивных фильтров. Выполнено численное моделирование сети с предлагаемой схемой фильтрокомпенсирующего устройства и произведен расчёт надёжности, доказывающий, что использование четырёхлучевого фильтра обеспечивает наработку на отказ, близкую к срокам службы основного сетевого электрооборудования. Предлагаемая топология фильтра состоит из трёх ветвей с тремя идентичными сопротивлениями и одного нейтрального ответвления. Данная схема позволяет уменьшить общее количество реактивных элементов, образующих фильтр, и повысить экономическую эффективность, например сетей освещения, в сравнении с традиционными схемами. С помощью такой схемы образуется силовой фильтр с двумя резонансными частотами. Одна резонансная частота – для гармоник токов, образующих симметричные составляющие прямой и обратной последовательности, а вторая резонансная частота – для токов, образующих систему нулевой последовательности. Для реализации схемы используются

только пассивные элементы. Приведены статические и динамические характеристики питающей сети с предлагаемой схемой фильтрокомпенсирующего устройства по результатам численного моделирования. Проведен сравнительный расчет надежности, подтверждающий, что применение 4-лучевого фильтра сохраняет уровень наработки на отказ основных элементов сети. Оценка уровня надежности выполнена по методике учета надежности каждого элемента схемы, участвующего в алгоритме преобразования электрических величин. Данная методика позволяет учесть интенсивность отказов в течение срока службы устройства. В соответствии с методикой расчет производится методом «л - характеристик», основанным на интенсивности отказов комплектующих изделий и поправочных коэффициентах, учитывающих реальные условия и режимы эксплуатации.

Ключевые слова: надежность, фильтрокомпенсирующее устройство, нелинейная нагрузка, гармонические составляющие.

Modern structure of energy consumption is determined by expanding the nonlinear load, the nature of which is determined by the algorithm of functioning of secondary power supply. For this reason power supplying organizations faced a serious problem of "contamination" distribution networks higher relative to industrial frequency harmonics. To reduce higher harmonics in the case of continued non-linear load resistance is possible to use filter-based devices passive filters. Numerical modeling of a network with the proposed scheme of the filter-device is made and the calculation of reli-

ability, proving that the use of four-pointed filter provides mean time to failure close to the time of the service core network equipment is executed. The proposed filter topology consists of three branches with three identical resistors and a neutral branch. This scheme allows reducing the total number of reactive elements forming the filter, and to increase economic efficiency, such as lighting networks, compared to traditional schemes. By means of such scheme the power filter with two resonant frequencies is formed. One resonant frequency is for harmonic currents forming the symmetric components of direct and reverse sequences, and the second resonant frequency is for the currents, forming a system of zero sequence. For the implementation of the scheme only passive elements are used. Static and dynamic characteristics of a power line with the offered scheme of the filter-device by the results of numerical modeling are given. Comparative calculation of reliability, confirming that the use of 4-prong filter keeps the level of the time between failures of basic elements of a network is made. The assessment of the level of reliability is made on the accounting of the reliability of each circuit element involved in the algorithm for the conversion of electrical quantities. This technique allows taking into account the failure rate during the service time of the device. In accordance with the methodology of the calculation is produced by the "λ- parameters", based on the failure rate of components and correction factors that take into account the real conditions and modes of operation.

Keywords: reliability, filter-device, the nonlinear load, harmonic components.

Введение. Современная структура электропотребления определяется расширяющейся нелинейной нагрузкой, характер которой определен алгоритмом функционирования источников вторичного электропитания (ИВЭ). По этой причине энергоснабжающие организации столкнулись с серьезной проблемой «заражения» распределительных сетей высшими по отношению к промышленной частоте гармониками.

Таким образом, актуальным является решение задачи фильтрации высших гармоник [1].

Для снижения высших гармоник, в случае неизменного нелинейного сопротивления нагрузки, возможно применение фильтрокомпенсирующих устройств на основе пассивных фильтров.

Пассивный фильтр гармоник (ПФГ) представляет пассивную частотно-селективную цепь, обеспечивающую подавление или ослабление высших гармоник, генерируемых нелинейной нагрузкой [2, 3]. Основными достоинствами пассивных фильтров являются их простота и экономичность. Они дешевы, не требуют регулярного обслуживания, могут выполнять одновременно функции как подавления гармоник, так и коррекции коэффициента мощности.

Основной традиционной конфигурацией ПФГ является последовательный колебательный контур (рис. 1), настроенный на частоту определенной гармоники. Для одновременного подавления нескольких гармоник используют широкополосные фильтры. Характеристики пассивных фильтров достаточно подробно описаны в [4–9].

Включение последовательного колебательного контура в каждую фазу трехфазной сети не вызывает симметрирующего эффекта.

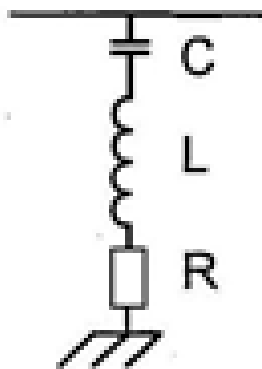


Рис. 1. Последовательный колебательный контур

Для симметрирования питающей сети и снижения влияния высших гармоник нелинейной нагрузки перспективным является использование в трехфазной сети фильтра, соединенного по схеме «звезда» с четырьмя ответвлениями (рис. 2) [10].

Рассматриваемая топология позволяет уменьшить общее количество реактивных элементов, образующих фильтр, и повысить экономическую эффективность, например сетей освещения, в сравнении с традиционными схемами [11].

С помощью такой схемы образуется силовой фильтр с двумя резонансными частотами. Одна резонансная частота – для гармоник токов, образующих симметричные составляющие прямой и обратной последовательности, а вторая резонансная частота – для токов, образующих систему нулевой последовательности. Для реали-

зации схемы используются только пассивные элементы.

Предлагаемая топология состоит из трёх ветвей с тремя идентичными сопротивлениями Z_ϕ и одного нейтрального ответвления Z_0 .

Для оценки надежности четырехлучевого фильтра был проведен расчет [12].

В соответствии с методикой расчет производился методом «λ-характеристик», основанным на интенсивности отказов комплектующих изделий и поправочных коэффициентах, учитывающих реальные условия и режимы эксплуатации. При этом принимались следующие допущения:

- 1) отказы комплектующих изделий (КИ) являются случайными независимыми событиями;
- 2) одновременно два и более КИ отказать не могут;

- 3) интенсивность отказов (ИО) КИ в течение срока службы в одних и тех же рабочих режимах и условиях эксплуатации является постоянной.

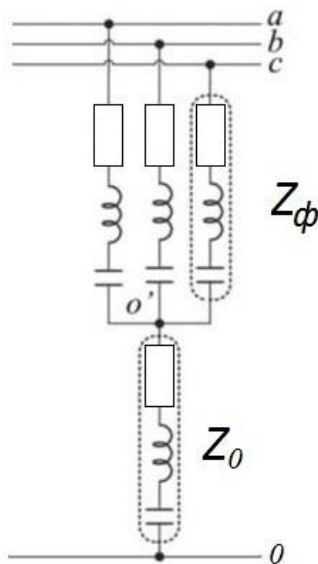


Рис. 2. «Звезда» с четырьмя ответвлениями

Интенсивность отказов блока, состоящего из m комплектующих изделий, определялась как

$$\Lambda = \sum_1^m \lambda_i,$$

где λ_i – интенсивность отказов i -го КИ в рабочих режимах и условиях.

Средняя наработка блока на отказ определялась как

$$T = \frac{1}{\Lambda}.$$

Интенсивность отказов КИ определялась как

$$\lambda_i = \lambda_0 \cdot a_1 \cdot a_2 \cdot \dots \cdot a_n,$$

где λ_0 – интенсивность отказов КИ в нормальных режимах и условиях эксплуатации; a_1, a_2, \dots, a_n – поправочные коэффициенты.

Значение λ_0 и поправочные коэффициенты определялись по таблицам, представленным в [12].

1. Фильтрокомпенсирующее устройство (ФКУ) состояло из следующих блоков:

- 1) блок управления током (БУТ) (рис. 3),
- 2) блок фильтрации в двух исполнениях:
 - однофазный (БФО) (рис. 4);
 - трехфазный (БФТ) (рис. 5).

Блок управления током состоял из следующих элементов: конденсатор, 2 резистора, 4 диода и 8 паяк, которые с позиций обеспечения надежности соединялись последовательно.

Блок фильтрации однофазный состоял из 5 дросселей, 5 конденсаторов, 5 резисторов и 10 болтовых соединений, а блок фильтрации трехфазный – из 4 дросселей, 3 конденсаторов и 8 болтовых соединений, которые с позиций обеспечения надежности также соединялись последовательно.

2. Время активной работы ФКУ за сутки составляло 12 часов.

3. Коэффициент нагрузки элементов $K_n = 0,7$.

4. Условия эксплуатации – поле с коэффициентом 1,0.

5. Климат – холодный с коэффициентом 1,0.

6. Качество обслуживания – управление агрегатами с коэффициентом 2.

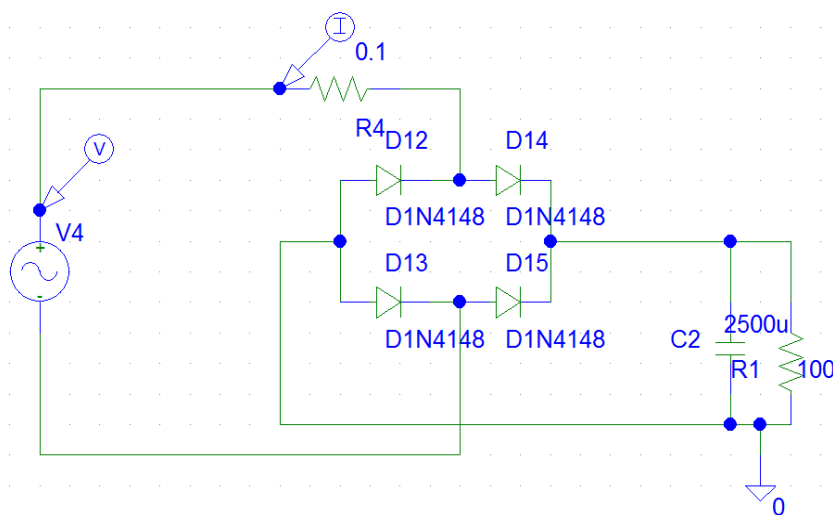


Рис. 3. Блок управления током

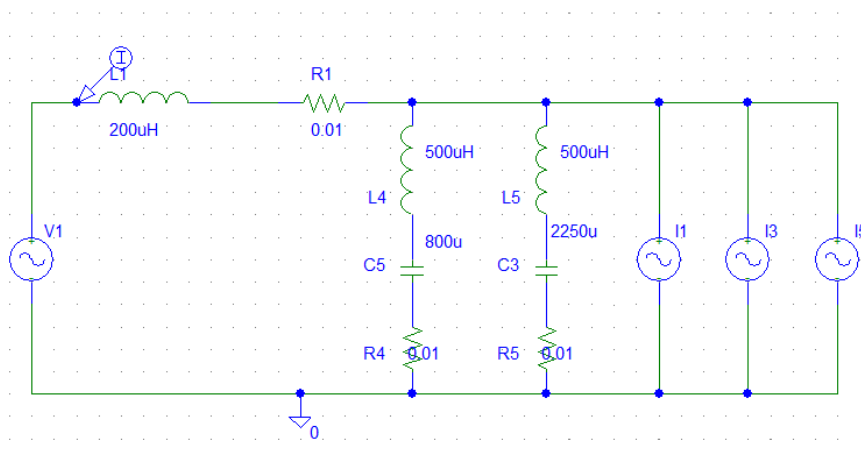


Рис. 4. Блок фильтрации однофазный

Общий поправочный коэффициент
 $a = 0,7 \cdot 1,0 \cdot 1,3 \cdot 2 = 1,82$.

Интенсивность отказов блока управления
 током:

диоды $0,1 \cdot 10^{-6} \cdot 4 = 0,4 \cdot 10^{-6}$;

резисторы $0,008 \cdot 10^{-6} \cdot 2 = 0,016 \cdot 10^{-6}$;

конденсатор $0,3 \cdot 10^{-6} \cdot 1 = 0,3 \cdot 10^{-6}$;

пайки $0,001 \cdot 10^{-6} \cdot 8 = 0,008 \cdot 10^{-6}$.

Итого $0,724 \cdot 10^{-6} \cdot 1/ч$.

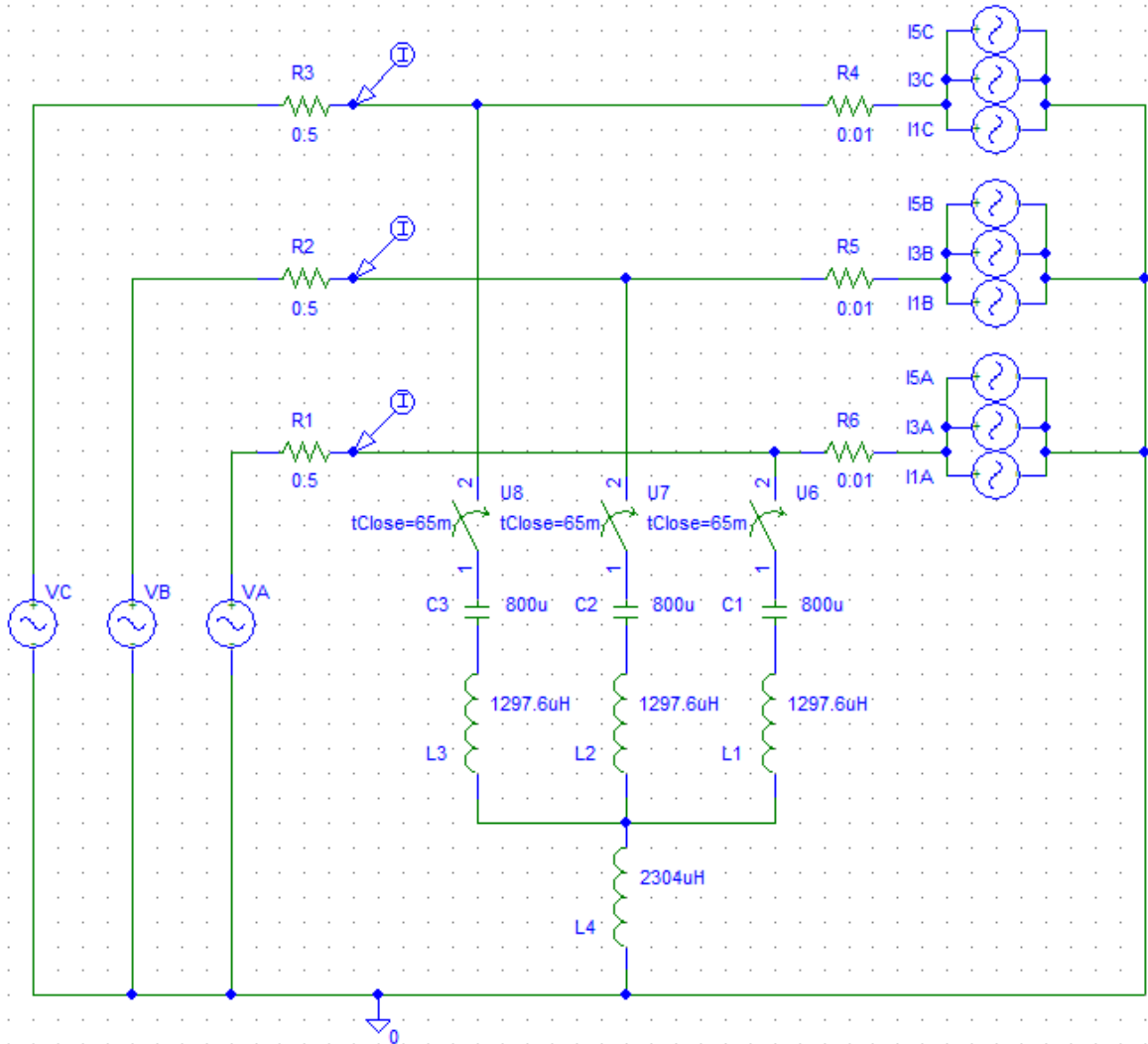


Рис. 5. Блок фильтрации трехфазный

Всего с учетом поправочного коэффициента

$$\Lambda = 1,82 \cdot 0,724 \cdot 10^{-6} = 1,32 \cdot 10^{-6} \cdot 1/ч.$$

Наработка на отказ

$$T = \frac{10^6}{1,32} = 0,76 \cdot 10^6 \text{ часов.}$$

Интенсивность отказов блока фильтрации
 однофазного:

индуктивности $0,15 \cdot 10^{-6} \cdot 5 = 0,75 \cdot 10^{-6}$;

конденсаторы $0,15 \cdot 10^{-6} \cdot 5 = 0,75 \cdot 10^{-6}$;

болтовые соединения $0,1 \cdot 10^{-6} \cdot 10 = 1,0 \cdot 10^{-6}$.

Итого $2,5 \cdot 10^{-6} \cdot 1/ч$.

Всего с учетом поправочных коэффициентов

$$\Lambda = 1,82 \cdot 2,5 \cdot 10^{-6} = 4,55 \cdot 10^{-6} \cdot 1/час.$$

$$T = \frac{10^6}{4,55} = 0,22 \cdot 10^6 \text{ часов.}$$

Интенсивность отказов блока фильтрации
 трехфазного:

индуктивности

$$0,15 \cdot 10^{-6} \cdot 4 = 0,6 \cdot 10^{-6};$$

конденсаторы

$$0,15 \cdot 10^{-6} \cdot 3 = 0,45 \cdot 10^{-6};$$

болтовые соединения $0,1 \cdot 10^{-6} \cdot 8 = 0,8 \cdot 10^{-6}$;

Итого $1,95 \cdot 10^{-6} \cdot 1/ч$.

Всего с учетом поправочных коэффициентов

$$\Lambda = 1,82 \cdot 1,95 \cdot 10^{-6} = 3,55 \cdot 10^{-6} \cdot 1/час.$$

$$T = \frac{10^6}{3,55} = 0,28 \cdot 10^6 \text{ часов.}$$

Интенсивность отказов ФКУ, состоящего из БУТ и БФО

$$\Lambda = \Lambda_1 + \Lambda_2 = 1,32 \cdot 10^{-6} + 4,55 \cdot 10^{-6} = 5,87 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч.}$$

Наработка на отказ $T = 1/\Lambda = 10^6/5,87 = 170358$ часов, или 19 лет.

Интенсивность отказов ФКУ, состоящего из БУТ и БФТ:

$$\Lambda = \Lambda_1 + \Lambda_3 = 1,32 \cdot 10^{-6} + 3,55 \cdot 10^{-6} = 4,87 \cdot 10^{-6} \text{ 1/час}$$

Наработка на отказ $T = 1/\Lambda = 10^6/4,87 = 205339$ часов, или 23 года.

В результате ориентировочных расчетов надежности фильтрокомпенсирующего устройства на этапе технического предложения установлено, что наработка на отказ составила 19 лет и 23 года, что сопоставимо со сроком службы основного электрооборудования систем электроснабжения.

Коэффициенты нагрузок элементов блоков рекомендуется устанавливать не более значеный, принятых при расчетах надежности.

Выводы

1. Из результатов расчета видно, что наработка часов на отказ ФКУ четырехлучевой структуры не уступает традиционной однолинейной схеме, что дает основание утверждать об увеличении экономической эффективности при ее использовании, например в сетях освещения.

2. Данная схема позволяет снизить на 30 % количество используемых реактивных элементов, образующих фильтр, что снижает его стоимость и повышает энергоэффективность электроустановки.

Литература

1. Проблемы обеспечения качества электроэнергии в городских распределительных сетях 0,4 кВ / Н.П. Боярская, Я.А. Кунгс, С.А. Темербаев [и др.] // Ползуновский вестник. – 2012. – № 4. – С. 89–94.
2. Буре А.Б., Мосичева И.А. Компенсация реактивной мощности и выбор фильтрующих устройств в сетях промышленных предприятий: учеб. пособие. – М.: Изд-во МЭИ, 2004. – 28 с.
3. IEEE transactions on Industry applications. – 2004. – Vol. 40. – № 1.
4. Das J.C. Power System Analysis-Short-circuit. Load Flow and Harmonics. – New York: Marcel Dekker, 2002.
5. Arrillaga J., Bradley D.A., Bodger P.S. Power System Harmonics. – New York: Wiley, 1985.
6. Gonzalez D.A., McCall J.C. Design of filters to reduce harmonic distortion in industrial power systems // IEEE Trans. Ind. Applicat. – 1987. – Vol. IA-23. – P. 504–512.
7. Phipps J.K. A transfer function approach to harmonic filter design // IEEE Ind. Applicat. Mag. – 1997. – Vol. 3. – P. 68–82.
8. Ludbrook A. Harmonic filters for notch reduction // IEEE Trans. Ind. Applicat. – 1988. – Vol. 24. – P. 947–954.
9. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике и электротехнике / А.Ф. Дьяков [и др.]; под ред. А.Ф. Дьякова. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 168 с.
10. Current Harmonics Cancellation in Three-Phase Four-Wire Systems by Using a Four-Branch Star Filtering Topology // IEEE transactions on Power ELECTRONICS. – 2009. – Vol. 24. – № 8. – P. 1939–1950.
11. Колмаков В.О., Пантелеев В.И. Четырехлучевой фильтр гармоник в распределительной сети // Безопасность регионов – основа устойчивого развития: мат-лы IV Междунар. науч.-практ. конф. (г. Иркутск, 22–26 сент. 2014 г.). – Иркутск: Изд-во ИРГУПС, 2014. – С. 154–159.
12. Рекомендации РМ 25 446-87. Изделия приборостроения. Методика расчета показателей безотказности. – М., 2987.

Literatura

1. Problemy obespechenija kachestva jelektroenergii v gorodskih raspreditel'nyh setjah 0,4 kV / N.P. Bojarskaja, Ja.A. Kungs, S.A. Temerbaev [i dr.] // Polzunovskij vestnik. – 2012. – № 4. – S. 89–94.
2. Bure A.B., Mosicheva I.A. Kompensacija reaktivnoj moshhnosti i vybor fil'trujushhih ustrojstv v setjah promyshlennyh predpriyatij: ucheb. posobie. – M.: Izd-vo MJeI, 2004. – 28 s.
3. IEEE transactions on Industry applications. – 2004. – Vol. 40. – № 1.
4. Das J.C. Power System Analysis-Short-circuit. Load Flow and Harmonics. – New York: Marcel Dekker, 2002.
5. Arrillaga J., Bradley D.A., Bodger P.S. Power System Harmonics. – New York: Wiley, 1985.
6. Gonzalez D.A., McCall J.C. Design of filters to reduce harmonic distortion in industrial power systems // IEEE Trans. Ind. Applicat. – 1987. – Vol. IA-23. – R. 504–512.
7. Phipps J.K. A transfer function approach to harmonic filter design // IEEE Ind. Applicat. Mag. – 1997. – Vol. 3. – R. 68–82.
8. Ludbrook A. Harmonic filters for notch reduction // IEEE Trans. Ind. Applicat. – 1988. – Vol. 24. – R. 947–954.
9. Jelektromagnitnaja sovmestimost' v jelektroenergetike i jelektrotehnikе / A.F. D'jakov [i dr.]; pod red. A.F. D'jakova. – M.: Jenergoatomizdat, 2003. – 168 s.
10. Current Harmonics Cancellation in Three-Phase Four-Wire Systems by Using a Four-Branch Star Filtering Topology // IEEE transactions on Rower ELECTRONICS. – 2009. – Vol. 24. – № 8. – R. 1939–1950.
11. Kolmakov V.O., Panteleev V.I. Chetyrehluchevoj fil'tr garmonik v raspreditel'noj seti // Bezopasnost' regionov – osnova ustojchivogo razvitija: mat-ly IV Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (g. Irkutsk, 22–26 sent. 2014 g.). – Irkutsk: Izd-vo IrGUPS, 2014. – S. 154–159.
12. Rekomendacii RM 25 446-87. Izdelija priborostroenija. Metodika rascheta pokazatelej bezotkaznosti. – M., 2987.

