

УДК 621.331

**ШИРОКОПОЛОСНЫЕ ГИБРИДНЫЕ ФИЛЬТРЫ
ДЛЯ ТРЕХФАЗНЫХ ЧЕТЫРЕХПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ****А.Ф. Синяговский, М.О. Чернышов, В.П. Довгун,
В.В. Новиков, С.А. Темербаев***Сибирский федеральный университет*

Основной причиной увеличения токов нейтральных проводников в трехфазных четырехпроводных сетях низкого напряжения являются современное офисное оборудование и несимметрия нагрузок. В статье рассмотрена новая конфигурация гибридного широкополосного фильтра для управления качеством электроэнергии в трехфазных четырехпроводных сетях. Предложенный фильтр образован последовательным соединением пассивного широкополосного фильтра и однофазного инвертора. Фильтр может работать как в пассивном, так и в гибридном режиме.

Компенсационные характеристики предложенного фильтра проанализированы с помощью моделирования в среде MATLAB. Анализ показал, что предложенный гибридный фильтр является эффективным средством ослабления токов нейтральных проводников.

Ключевые слова: трехфазная четырехпроводная сеть, гибридный силовой фильтр, ток нейтрального провода.

DOI: 10.17212/1727-2769-2018-3-91-102

Введение

Значительное ухудшение качества электроэнергии в трехфазных четырехпроводных сетях низкого напряжения, которое наблюдается в последние годы, вызвано изменением характера электрических нагрузок офисных, коммерческих и бытовых потребителей. Основную долю нагрузок этих потребителей составляют сравнительно маломощные нелинейные электроприемники, такие как энергосберегающие системы освещения, офисная и компьютерная техника, частотно-регулируемые электроприводы.

В спектре тока, потребляемого однофазными нелинейными нагрузками, преобладает составляющая с частотой третьей гармоники. Гармоники, кратные трем, в трехфазных четырехпроводных сетях образуют систему нулевой последовательности и суммируются в нейтральных проводниках. Это приводит к увеличению потерь, ускоренному старению изоляции и вызванному этим сокращению срока службы электрооборудования, а в ряде случаев – к авариям, вызванным перегревом и разрушением нулевых проводников кабельных линий. Увеличение падения напряжения между нейтральной точкой и землей приводит к сбоям в работе чувствительного электронного оборудования. Кроме того, большие уровни токов третьей гармонической составляющей вызывают дополнительный нагрев обмоток трансформаторов.

Другая проблема трехфазных сетей низкого напряжения заключается в том, что неравномерное включение однофазных нагрузок может вызвать значительную несимметрию токов и напряжений сети. При этом систему нулевой последовательности образуют не только гармоники, кратные трем, но и другие гармоники, что приводит к дополнительному увеличению токов нейтральных проводников.

Ухудшение качества электроэнергии в сетях коммерческих и офисных потребителей вызывает увеличение капитальных вложений и эксплуатационных расхо-

дов, связанных с преждевременной заменой оборудования и необходимостью проводить организационные и технические мероприятия по улучшению ситуации. Это требует установки пассивных или активных фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ).

Основные функции компенсирующих устройств, устанавливаемых в трехфазных четырехпроводных сетях низкого напряжения, заключаются в ослаблении токов нейтральных проводников, уменьшении несимметрии напряжений, компенсации реактивной мощности.

Простейшим решением является пассивный фильтр, включенный параллельно нагрузке. На эффективность применения таких фильтров в сетях 0,4 кВ значительное влияние оказывает высокий уровень активного сопротивления сети. Поэтому их использование часто не дает желаемого эффекта [1–3].

Другой вариант пассивного компенсирующего устройства для трехфазных четырехпроводных сетей представляет собой пассивный заграждающий фильтр, настроенный на частоту третьей гармоники и включенный в нейтральный провод [4, 5]. Заграждающий фильтр эффективно ослабляет спектральные составляющие тока нейтрального проводника, имеющие частоту третьей гармоники. Однако анализ, проведенный в [4], показал, что включение заграждающего фильтра вызывает уменьшение среднего значения напряжения на входе выпрямителя. Это приводит к уменьшению выпрямленного напряжения и снижению энергетических показателей преобразовательных устройств.

Распространенным средством уменьшения токов в нейтральных проводниках являются трансформаторы с обмотками, соединенными по схеме «зигзаг». Принцип действия устройства, реализованного по такой схеме, основан на взаимной компенсации магнитных потоков, вызванных токами нулевой последовательности. Такие устройства имеют минимальное сопротивление для токов, образующих систему нулевой последовательности как на основной частоте, так и на частотах высших гармоник. Общая теория пассивных компенсирующих устройств, использующих такой принцип, рассмотрена в [1].

Серьезный недостаток рассматриваемой схемы заключается в том, что она имеет большие габариты и вес. Это может вызвать трудности при установке компенсирующих устройств в офисных зданиях. Кроме того, зигзаг-трансформатор имеет малое сопротивление и для составляющих нулевой последовательности, создаваемых внешней сетью. Это может вызвать значительное увеличение тока в нейтральном проводнике, если напряжение сети несимметрично и содержит составляющие, образующие систему нулевой последовательности.

Универсальным техническим средством управления качеством электроэнергии в трехфазных сетях, обеспечивающим компенсацию реактивной мощности и ослабление высших гармоник, являются активные фильтры (АФ) на основе трехфазных инверторов [6]. Недостатком таких устройств является большое количество ключей, сложные алгоритмы управления. Широкое применение АФ ограничивается их сложностью и высокой стоимостью. Для эффективного ослабления высших гармоник активный фильтр должен иметь значительную мощность, сравнимую с мощностью нелинейной нагрузки. Вследствие этого использование силовых активных фильтров может оказаться экономически нецелесообразным.

Компромиссным решением являются гибридные компенсирующие устройства, представляющие комбинацию активного и пассивного фильтров. Совместное использование пассивного и активного фильтров позволяет уменьшить мощность и стоимость последнего. При этом активный фильтр служит для улучшения компенсационных характеристик пассивного устройства.

Гибридные фильтрокомпенсирующие устройства для трехфазных четырехпроводных сетей рассматривались в [3, 7]. Недостаток гибридных ФКУ, рассмотренных в этих работах, заключается в том, что в качестве пассивного компонента используется зигзаг-трансформатор.

В настоящей статье предложена конфигурация гибридного фильтрокомпенсирующего устройства для трехфазных четырехпроводных сетей, в котором пассивная часть реализована широкополосным фильтром, настроенным на частоты гармоник, образующих систему нулевой последовательности. Замена зигзаг-трансформатора пассивным фильтром упрощает и удешевляет конструкцию ФКУ.

1. Гибридный широкополосный фильтр

Схема предлагаемого гибридного фильтра показана на рис. 1.

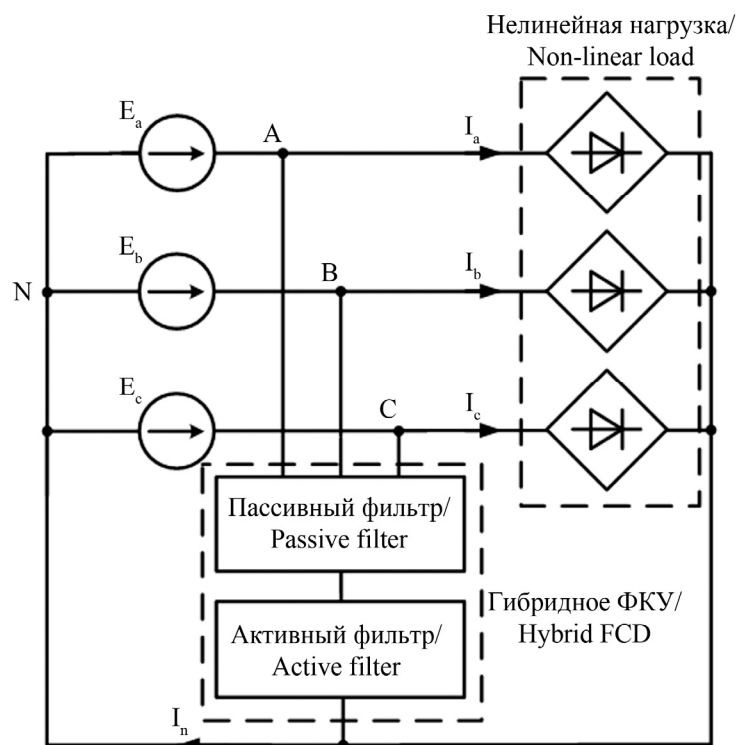


Рис. 1 – Схема гибридного фильтра

Fig. 1 – Configuration of the hybrid filter

В качестве пассивного фильтра используется широкополосный фильтр (ШПФ), имеющий малое сопротивление на частотах высших гармоник ($n = 3, 5, \dots$). На рис. 2 показана схема ШПФ пятого порядка. Фильтр имеет три входа, подключаемых к разноименным фазам сети.

Силовая часть активного фильтра в схеме на рис. 1 представляет собой однофазный инвертор. Напряжение активного фильтра пропорционально гармоническому составляющему тока нейтрального проводника:

$$U_{\text{аф}} = R_{\text{аф1}} I_n^{(1)} + R_{\text{аф2}} I_n^{(h)}.$$

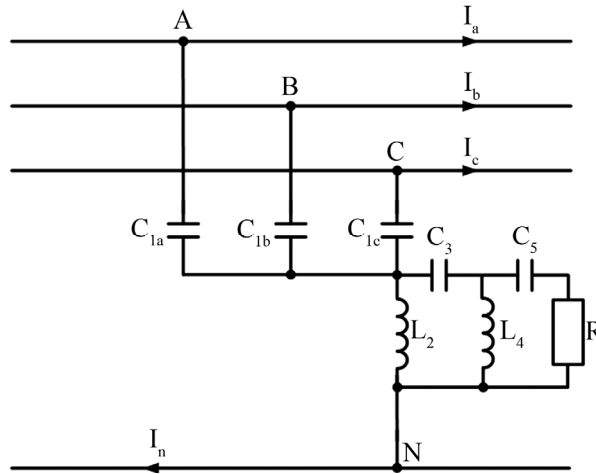


Рис. 2 – Широкополосный пассивный фильтр

Fig. 2 – Broadband passive filter

Здесь $R_{\text{аф1}}$, $R_{\text{аф2}}$ – управляющие параметры активного фильтра, $I_n^{(1)}$ – составляющая тока нейтрального проводника с частотой основной гармоники; $I_n^{(h)}$ – высокочастотные составляющие тока нейтрали.

Управляющие параметры АФ имеют частотные характеристики режекторного и полосно-пропускающего фильтров, настроенных на частоту сети ω_c :

$$R_{\text{аф1}}(e^{j\omega}) = \begin{cases} 1 & \omega \neq \omega_0, \\ 0 & \omega = \omega_0; \end{cases}$$

$$R_{\text{аф2}}(e^{j\omega}) = \begin{cases} 0 & \omega \neq \omega_0, \\ 1 & \omega = \omega_0. \end{cases}$$

Перечислим преимущества предлагаемого устройства.

1. Важным достоинством является относительно невысокая стоимость, поскольку для силовой части активного фильтра необходим только однофазный инвертор. Кроме того, в трехфазной сети используется только один пассивный фильтр.

2. Удобство установки, так как фильтр включается параллельно нагрузке.

3. Предлагаемое устройство может работать как в пассивном (инвертор отключен), так и в гибридном режиме.

Схема замещения трехфазной сети и гибридного фильтра для составляющих токов и напряжений, образующих симметричную систему нулевой последовательности, показана на рис. 3. Источником высших гармоник может быть внешняя сеть или нелинейная нагрузка, представленная источником тока $3J_{0h}$. Здесь \dot{E}_{0c} , J_{0h} – составляющие напряжения сети и тока нагрузки, образующие систему нулевой последовательности; $Z_{\text{пф}}$, Z_c и Z_N – комплексные сопротивления соответственно пассивного фильтра, фазных и нейтрального проводников на частоте k -й гармоники. Активный фильтр в схеме замещения на рис. 3 представлен управляемым источником напряжения $U_{\text{аф}} = R_{\text{аф}} I_n$.

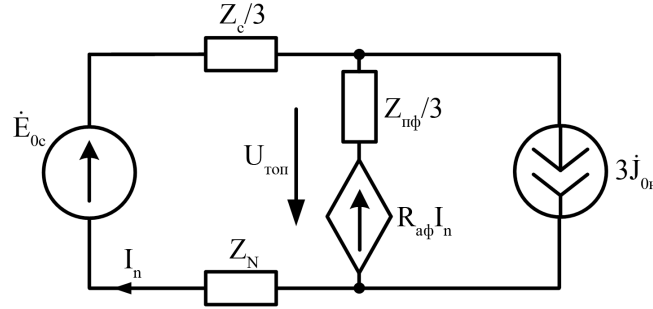


Рис. 3 – Схема замещения сети и гибридного фильтра для составляющих нулевой последовательности

Fig. 3 – Zero-sequence equivalent circuit of the power system and hybrid filter

Ток нейтрального проводника

$$I_n = \frac{3E_{0c}}{Z_c + Z_{пф} + 3(Z_N + R_{аф})} - \frac{Z_{пф}J_{0н}}{Z_c + Z_{пф} + 3(Z_N + R_{аф})}. \quad (1)$$

Напряжение в точке общего подключения нелинейной нагрузки и гибридного фильтра

$$\dot{U}_{\text{топ}} = \frac{(Z_{пф} + 3R_{аф})E_{0c}}{Z_c + Z_{пф} + 3(Z_N + R_{аф})} + \frac{Z_{пф}(Z_c + 3R_{аф})J_{0н}}{Z_c + Z_{пф} + 3(Z_N + R_{аф})}. \quad (2)$$

Напряжение между нейтральными точками

$$\dot{U}_{nN} = \frac{3Z_n E_{0c}}{Z_c + Z_{пф} + 3(Z_N + R_{аф})} - \frac{Z_n Z_{пф} J_{0н}}{Z_c + Z_{пф} + 3(Z_N + R_{аф})}. \quad (3)$$

Из формул (1–3) следует, что для составляющих токов и напряжений, образующих симметричную систему нулевой последовательности, действие активного фильтра эквивалентно включению резистора $R_{аф}$ последовательно с сопротивлением нейтрального провода Z_n . Это способствует уменьшению тока в нейтральном проводнике, снижению напряжения между нейтральными точками. Кроме того, уменьшается возможность возникновения нежелательных резонансных явлений между сетью и пассивным фильтром. Если $R_{аф} \gg Z_c$, активный фильтр оказывает доминирующее влияние на характеристики гибридного устройства.

Пассивный фильтр (рис. 2) представляет собой резистивно нагруженный LC -четырёхполюсник лестничной структуры. Общий метод расчета широкополосных силовых фильтров произвольного порядка, основанный на использовании методов синтеза пассивных LC -фильтров, рассмотрен в [8]. Однако фильтры, рассмотренные в [8], имеют монотонную частотную характеристику входного сопротивления. В рассматриваемом случае необходимо, чтобы широкополосный фильтр осуществлял селективное подавление наиболее мощных гармоник, в первую очередь третьей. Для получения требуемой частотной характеристики были использованы методы оптимизации.

Задача оптимизации была сформулирована следующим образом: найти значения элементов цепи, обеспечивающих минимум целевой функции

$$\Phi(\bar{x}) = \sum_{(k)} w_k \left(Z(\bar{x}, \omega_k) - R_k \right)^2, \quad k = 1, 2, \dots, \bar{x} \in \{L_i, C_i\}, \quad (4)$$

при выполнении ограничений на значения элементов:

$$L_i > 0, \quad C_i > 0.$$

В формуле (4) приняты следующие обозначения:

$Z(\bar{x}, \omega_k)$ – модуль входного сопротивления фильтра на частоте ω_k ;

R_k – требуемое значение входного сопротивления на частоте ω_k ;

w_k – весовые коэффициенты, учитывающие важность k -го слагаемого.

С помощью предложенной процедуры оптимизации были рассчитаны значения элементов фильтра пятого порядка, обеспечивающего подавление третьей гармоники и ослабление высокочастотных составляющих ($n = 5, 7, \dots$). Для оптимизации использовался пакет *Optimization Toolbox* программного комплекса *MatLab*.

2. Моделирование характеристик гибридного фильтра

Для исследования характеристик предложенного фильтра используем модель, реализованную в системе *Matlab*.

Схема модели показана на рис. 4. Параметры модели сети: сопротивление сети $R_c = 1$ Ом, индуктивность $L_c = 0,318$ мГн. Нагрузка имеет линейную и нелинейную части. Нелинейной нагрузкой являются однофазные мостовые выпрямители. Параметры нелинейной нагрузки: сопротивление нагрузки $R_n = 40$ Ом, емкость сглаживающего фильтра $C = 530$ мкФ, индуктивность $L_n = 1,2$ мГн. Мощность нагрузки $S_n = 2,13$ кВА.

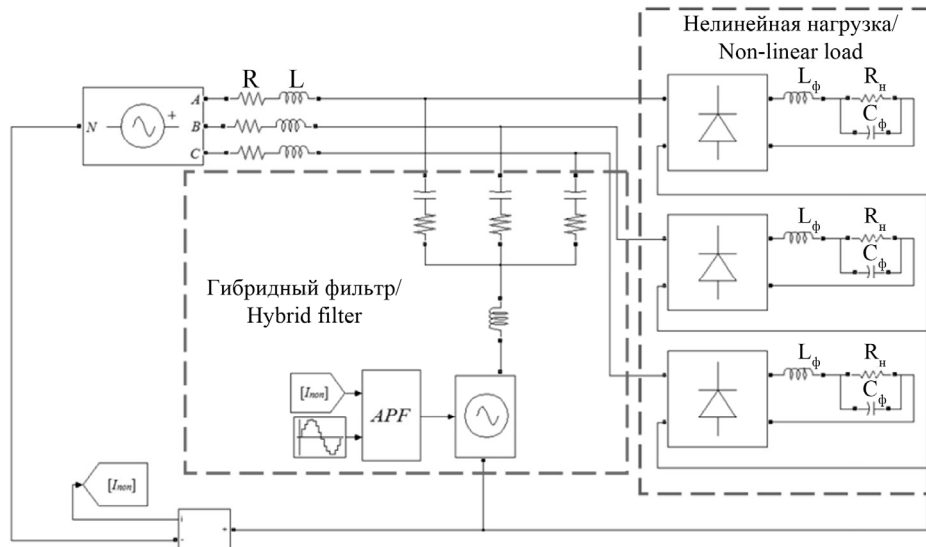


Рис. 4 – Модель гибридного фильтра в системе Matlab

Fig. 4 – MATLAB model of the hybrid filter

Линейная нагрузка представляет последовательную RL -цепь, включенную в каждую фазу. Параметры линейной нагрузки: активное сопротивление $R_n = 15 \text{ Ом}$, индуктивность $L_n = 47,8 \text{ мГн}$. Мощность нагрузки $S_n = 1,57 \text{ кВА}$.

Значения параметров активного фильтра: $R_{af1} = 0 \text{ Ом}$, $R_{af2} = 13 \text{ Ом}$.

Симметричная нагрузка. На рис. 5 показана кривая тока I_n в нейтральном проводнике. Пассивный фильтр включается в момент $t = 0,2 \text{ с}$. При $t = 0,4 \text{ с}$ включается активный фильтр.

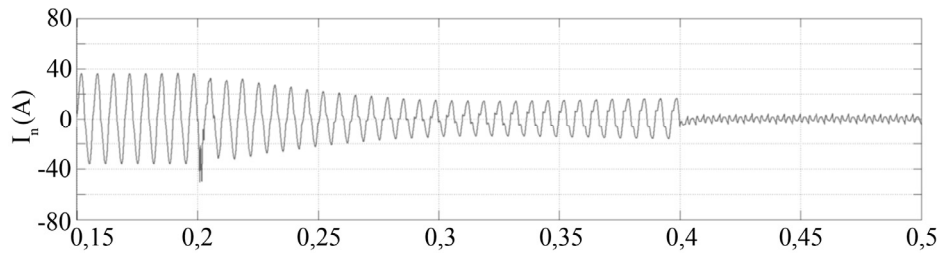


Рис. 5 – Ток в нейтральном проводнике

Fig. 5 – Neutral line current (balanced load)

На рис. 6 показан спектр тока I_n для различных режимов работы фильтра.

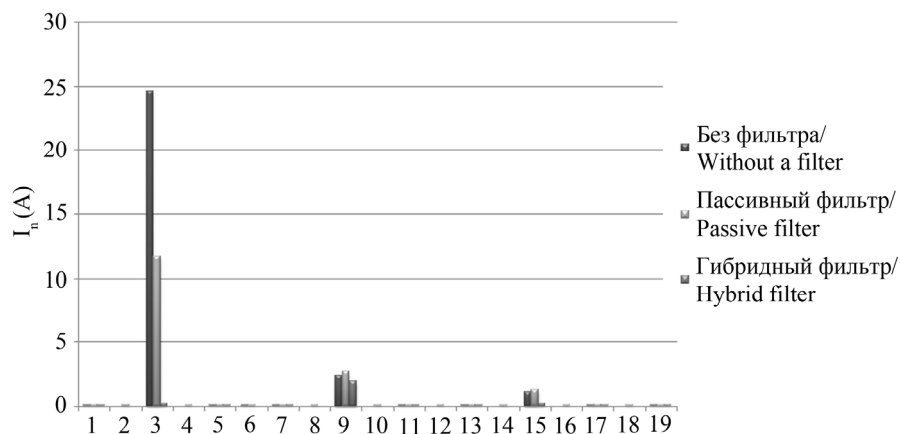


Рис. 6 – Спектр тока I_n (симметричная нагрузка)

Fig. 6 – Spectrum of the neutral current (balanced load)

Результаты моделирования сети с симметричной нагрузкой сведены в табл. 1.

Таблица 1 / Table 1

Результаты моделирования сети (симметричная нагрузка)

Summary of simulation results (balanced load)

Режим сети	I_a (A)	I_n (A)	U_{Nn} (B)	$THD I_a$ (%)	$THD U_{an}$ (%)
Без ФКУ	21,33	24,6	2,45	53,71	4,38
ПФКУ	19,05	10,8	1,77	44,28	2,88
ГФКУ	18,78	1,6	1,27	39,72	2,77

Результаты моделирования показывают, что при симметричном режиме трехфазной сети гибридный фильтр эффективно ослабляет ток нейтрального проводника, а также уменьшает составляющие напряжения в точке общего присоединения, имеющие частоту третьей гармоники. После включения фильтра действующее значение тока нейтрального проводника I_n уменьшилось более чем в 15 раз, с 24,6 до 1,6 А. Суммарный коэффициент гармоник линейного тока I_a уменьшился с 53,7 до 39,72 %. Отметим, что при этом мощность активного фильтра не превышает 10 % мощности пассивного фильтра.

Несимметричная нагрузка. Для исследования характеристик предложенного фильтра при несимметричном режиме были изменены параметры линейной нагрузки в фазе A : сопротивление нагрузки $R_n = 10$ Ом, индуктивность $L = 31,847$ мГн. Остальные параметры сети остались без изменений. На рис. 7 показана кривая тока в нейтральном проводе при несимметричном режиме работы сети. Как и в первом случае, пассивный и активный фильтры включаются в моменты $t = 0,2$ с и $t = 0,4$ с соответственно.

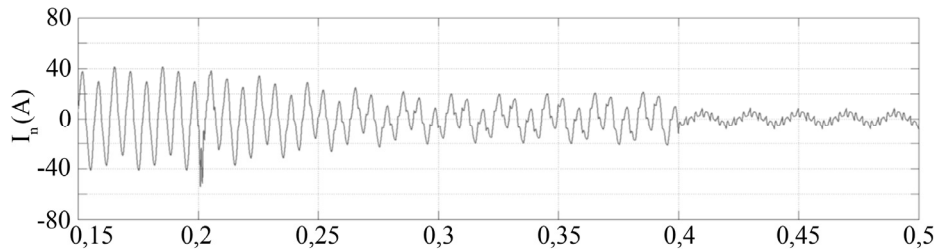


Рис. 7 – Ток в нейтральном проводнике

Fig. 7 – Neutral line current (nonbalanced load)

На рис. 8 показан спектр тока I_n для различных режимов работы фильтра.

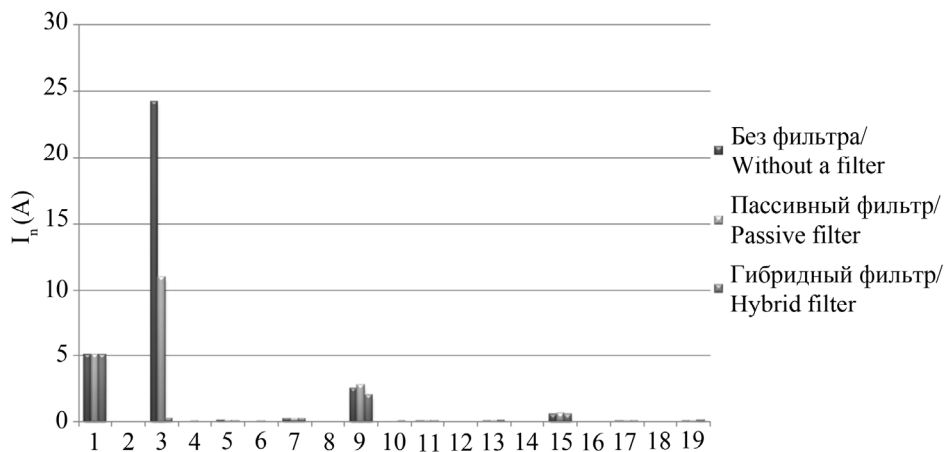


Рис. 8 – Спектр тока I_n (несимметричная нагрузка)

Fig. 8 – Spectrum of the neutral current (nonbalanced load)

Результаты моделирования сети с симметричной нагрузкой сведены в табл. 2.

Таблица 2 / Table 2

Результаты моделирования сети (несимметричная нагрузка)

Summary of simulation results (nonbalanced load)

Режим сети	I_a (A)	I_n (A)	U_{Nn} (B)	THD I_a (%)	THD U_{an} (%)
Без ФКУ	25,57	25	2,5	42,6	2,23
ПФКУ	22,8	11,84	1,84	35,69	2,96
ГФКУ	21,4	5,24	1,32	34	2,79

После включения фильтра действующее значение тока I_n уменьшилось с 25 до 5,24 А.

Закключение

Рассмотрена новая конфигурация широкополосного гибридного фильтра, предназначенного для ослабления тока нейтрального проводника, вызванного нелинейным характером и несимметрией однофазных нелинейных нагрузок. Важным достоинством предложенного фильтра является его невысокая стоимость, поскольку для реализации силовой части фильтра необходим однофазный инвертор. Кроме того, не требуется трансформатор с обмотками, соединенными по схеме «зигзаг».

Исследованы характеристики предложенного фильтра для случаев симметричной и несимметричной нелинейной нагрузки. Моделирование показало, что предложенный гибридный фильтр эффективно ослабляет ток нейтрального проводника и напряжение между нейтральными точками как в симметричной, так и в несимметричной трехфазной цепи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шидловский А.К., Жаркин А.Ф. Высшие гармоники в низковольтных электрических сетях. – Киев: Наукова думка, 2006. – 210 с.
2. Impacts over the distribution grid from the adoption of distributed harmonic filters on low-voltage customers / M.Ed.L. Tostes, U.H. Bezerra, R.D.S. Silva, J.A.L. Valente, C.C.M. de Moura, T.M.M. Branco // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2005. – Vol. 20, N 1. – P. 384–389.
3. A new hybrid power conditioner for suppressing harmonics and neutral-line current in three-phase four-wire distribution power systems / J.-C. Wu, H.-L. Jou, H.-H. Hsiao, S.-T. Xiao // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2014. – Vol. 29, N 4. – P. 1525–1532.
4. Key T., Lai J.-S. Analysis of harmonic mitigation methods for building wiring systems // IEEE Transactions on Power Systems. – 1998. – Vol. 13, N 3. – P. 890–897.
5. Piel J., Lowenstein M. Experimental measurements of energy consumption changes in a wye distribution system serving multiple computer loads as various harmonic solutions are applied // Proceedings of IEEE 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP). – Lake Placid, NY, 2004. – P. 294–298.
6. Akagi H. Active harmonic filters // Proceedings of the IEEE. – 2005. – Vol. 93, N 12. – P. 2128–2141.
7. Choi S., Jang M. Analysis and control of a single-phase-inverter-zigzag-transformer hybrid neutral-current suppressor in three-phase four wire systems // IEEE Transactions on Industry Electronics. – 2007. – Vol. 54, N 4. – P. 2201–2208.
8. Синтез фильтрокомпенсирующих устройств для систем электроснабжения: коллективная монография / Н.П. Боярская, В.П. Довгун, Д.Э. Егоров, С.А. Темербаев, Е.С. Шевченко; под ред. В.П. Довгуна. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2014. – 192 с.

BROADBAND HYBRID FILTER FOR THREE-PHASE FOUR-WIRE POWER SYSTEMS

Sinyagovskiy A.F., Chernyshov M.O., Dovgun V.P.,
Novikov V.V., Temerbaev S.A.

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Load unbalance and modern office equipment result in a significant neutral current in three-phase four-wire low-voltage power systems. This paper considers a new configuration of hybrid broadband filter for power quality management in three-phase four-wire low voltage power systems. The proposed hybrid filter is composed of a single-phase power converter and the broadband passive filter connected in series. The hybrid filter can be operated in both passive and hybrid mode. The compensating performance of the filter is confirmed with computer simulation using MATLAB software. Analysis and simulation proved that the hybrid filter is an effective solution for neutral current mitigation.

Keywords: three-phase four-wire power system; hybrid power filter; neutral line current.

DOI: 10.17212/1727-2769-2018-3-91-102

REFERENCES

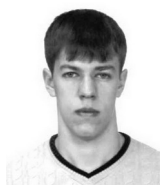
1. Shidlovskii A.K., Zharkin A.F. *Vysshie garmoniki v nizkovol'tnykh elektricheskikh setyakh* [Higher harmonics in low-voltage electrical networks]. Kiev, Naukova dumka Publ., 2006. 210 p.
2. Tostes M.Ed.L., Bezerra U.H., Silva R.D.S., Valente J.A.L., Moura C.C.M. de, Branco T.M.M. Impacts over the distribution grid from the adoption of distributed harmonic filters on low-voltage customers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2005, vol. 20, no. 1, pp. 384–389.
3. Wu J.-C., Jou H.-L., Hsiao H.-H., Xiao S.-T. A new hybrid power conditioner for suppressing harmonics and neutral-line current in three-phase four-wire distribution power systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2014, vol. 29, no. 4, pp. 1525–1532.
4. Key T., Lai J.-S. Analysis of harmonic mitigation methods for building wiring systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1998, vol. 13, no. 3, pp. 890–897.
5. Piel J., Lowenstein M. Experimental measurements of energy consumption changes in a wye distribution system serving multiple computer loads as various harmonic solutions are applied. *Proceedings of IEEE 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, Lake Placid, NY, 2004, pp. 294–298.
6. Akagi H. Active harmonic filters. *Proceedings of the IEEE*, 2005, vol. 93, no. 12, pp. 2128–2141.
7. Choi S., Jang M. Analysis and control of a single-phase–inverter–zigzag–transformer hybrid neutral-current suppressor in three-phase four wire systems. *IEEE Transactions on Industry Electronics*, 2007, vol. 54, no. 4, pp. 2201–2208.
8. Boyarskaya N.P., Dovgun V.P., Egorov D.E., Temerbaev S.A., Shevchenko E.S. *Sintez fil'tro-kompensiruyushchikh ustroystv dlya sistem elektrosnabzheniya* [Synthesis of filtering and compensating devices for power delivery systems]. Krasnoyarsk, Siberian federal university Publ., 2014. 192 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Синяговский Артем Феликсович – родился в 1965 году, канд. техн. наук, доцент кафедры систем автоматики, автоматизированного управления и проектирования, Институт космических и информационных технологий, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет». Область научных интересов: системы управления качеством электроэнергии. Опубликовано 19 научных работ. (Адрес: 660074, Россия, г. Красноярск, ул. Киренского, 26. E-mail: asinyagovskiy@sfu-kras.ru).

Sinyagovskiy Artem Feliksovich (b. 1965) – Candidate of Sciences (Eng.), associated professor at the department of Systems of automatic equipment, automated management and design, Institute of Space and Information Technologies, Siberian Federal University. His research interests are currently focused on power quality management systems. He is author of 19 scientific papers. (Address: 26, Kirensky St., Krasnoyarsk, 660074, Russia. E-mail: asinyagovskiy@sfu-kras.ru).



Чернышов Максим Олегович – родился в 1991 году, аспирант кафедры систем автоматики, автоматизированного управления и проектирования, Институт космических и информационных технологий, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет». Область научных интересов: системы управления качеством электроэнергии. Опубликовано 17 научных работ. (Адрес: 660074, Россия, г. Красноярск, ул. Киренского, 26. E-mail: chernyshov.m.o@gmail.com).

Chernyshov Maxim Olegovich (b. 1991) – post-graduate student at the department of Systems of automatic equipment, automated management and design, Institute of Space and Information Technologies, Siberian Federal University. His research interests are currently focused on power quality management systems. He is author of 19 scientific papers. (Address: 26, Kirensky St., Krasnoyarsk, 660074, Russia. E-mail: chernyshov.m.o@gmail.com).



Довгун Валерий Петрович – родился в 1955 году, д-р техн. наук, профессор кафедры систем автоматики, автоматизированного управления и проектирования, Институт космических и информационных технологий, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет». Область научных интересов: синтез аналоговых и цифровых цепей и систем; системы управления качеством электроэнергии. Опубликовано 160 научных работ. (Адрес: 660074, Россия, г. Красноярск, ул. Киренского, 26. E-mail: valerydovgun@gmail.com).

Dovgun Valery Petrovich – (b. 1955) – Doctor of Sciences (Eng.), professor at the department of Systems of automatic equipment, automated management and design, Institute of Space and Information Technologies, Siberian Federal University. His research interests are currently focused on synthesis of analog and digital circuits and systems, power quality management systems. He is author of 160 scientific papers. (Address: 26, Kirensky St., Krasnoyarsk, 660074, Russia. E-mail: valerydovgun@gmail.com).



Новиков Виктор Валерьевич – родился в 1983 году, канд. техн. наук, доцент кафедры систем автоматики, автоматизированного управления и проектирования, Институт космических и информационных технологий, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет». Область научных интересов: электроэнергетика, системы управления качеством электроэнергии. Опубликовано 17 научных работ. (Адрес: 660074, Россия, г. Красноярск, ул. Киренского, 26. E-mail: nvfagot@mail.ru).

Novikov Viktor Valerievich – (b. 1983) – Candidate of Sciences (Eng.), associate professor at the Department of Automation Systems, Automated Control and Design, Institute of Space and Information Technologies, Siberian Federal University. His research interests are currently focused on energy systems, power quality management systems. He is author of 17 scientific papers. (Address: 26, Kirensky St., Krasnoyarsk, 660074, Russia. E-mail: nvfagot@mail.ru).



Темербаев Сергей Андреевич – родился в 1989 году, канд. техн. наук, доцент кафедры систем автоматики, автоматизированного управления и проектирования, Институт космических и информационных технологий, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет». Область научных интересов: электроэнергетика, качество электроэнергии. Опубликовано 23 научные работы. (Адрес: 660074, Россия, г. Красноярск, ул. Киренского, 26. E-mail: temwork@mail.ru).

Temerbaev Sergey Andreevich – (b. 1989) – Candidate of Sciences (Eng.), associate professor at the department of Systems of automatic equipment, automated management and design, Institute of Space and Information Technologies, Siberian Federal University. His research interests are currently focused on power systems, power quality monitoring. He is author of 23 scientific papers. (Address: 26, Kirensky St., Krasnoyarsk, 660074, Russia. E-mail: temwork@mail.ru).

*Статья поступила 10 сентября 2018 г.
Received September 10, 2018*

To Reference:

Sinyagovskiy A.F., Chernyshov M.O., Dovgun V.P., Novikov V.V., Temerbaev S.A. Shirokopolosnye gibridnye fil'try dlya trekhfaznykh chetyrekhprovodnykh setei [Broadband hybrid filter for three-phase four-wire power systems]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2018, no. 3 (40), pp. 91–102. doi: 10.17212/1727-2769-2018-3-91-102.