

## ГИБРИДНЫЕ СИЛОВЫЕ ФИЛЬТРЫ ДЛЯ ТРЕХФАЗНЫХ ЧЕТЫРЕХПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ

М.О. ЧЕРНЫШОВ, В.П. ДОВГУН, О.Е. МАЛОШЕНОК

Сибирский федеральный университет, институт космических и информационных технологий, г. Красноярск

*Перегрузка нейтральных проводников является серьезной проблемой для трехфазных четырехпроводных распределительных сетей. В статье рассмотрен гибридный силовой фильтр, обеспечивающий ослабление высших гармоник тока в нейтральном проводнике трехфазной четырехпроводной сети. Устройство образовано последовательным соединением пассивного фильтра и однофазного инвертора. Моделирование показало, что предложенный гибридный фильтр эффективно ослабляет высшие гармоники тока нейтрального проводника как при симметричной, так и несимметричной нагрузке трехфазной цепи.*

*Ключевые слова: гибридные силовые фильтры, гармоники, трехфазные четырехпроводные сети.*

### Введение

В последние годы наблюдаются значительные искажения синусоидальной формы токов и напряжений в сетях электроснабжения большинства промышленных предприятий, а также в непромышленном секторе (коммерческие и офисные потребители, медицинские учреждения, жилой сектор). Причиной является изменение характера электрических нагрузок многих потребителей, вызванное широким внедрением энергосберегающих систем освещения, офисной и компьютерной техники, частотно-регулируемых электроприводов [1–3]. Особенность искажающих нагрузок коммерческих, офисных и бытовых потребителей заключается в том, что они, как правило, однофазные и имеют небольшую мощность. В спектрах токов таких потребителей доминирующими являются низкочастотные составляющие ( $n = 3, 5$ ).

Для трехфазных четырехпроводных сетей серьезную проблему представляют токи нулевой последовательности, в частности третья гармоническая составляющая, суммирующаяся в нейтральных проводниках. Это приводит к увеличению потерь, а в ряде случаев – к авариям, вызванным повреждением нейтрального провода [4, 5]. Увеличение падения напряжения между нейтральной точкой и землей приводит к неправильной работе чувствительного электронного оборудования. Кроме того, большие уровни токов третьей гармонической составляющей вызывают дополнительный нагрев обмоток трансформаторов.

Для уменьшения отрицательного влияния на качество электроэнергии предусматривают выполнение организационных и технических мероприятий, заключающихся в изменении условий распространения токов высших гармоник [6, 7]. Однако в эксплуатируемых сетях сделать это непросто. Во многих случаях необходима установка технических средств, обеспечивающих фильтрацию высших гармоник токов и напряжений.

В распределительных сетях используются специальные компенсирующие устройства – силовые пассивные фильтры гармоник (ПФГ). Они имеют невысокую стоимость, не требуют регулярного обслуживания, выполняют одновременно функции ослабления гармоник и коррекции коэффициента мощности. Однако 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 [6, 8].

Альтернативой пассивным компенсирующим устройствам являются активные фильтры гармоник (АФГ). Это устройства, характеристики которых формируются с помощью специального закона управления. АФГ могут выполнять одновременно подавление высших гармоник, коррекцию коэффициента мощности, уменьшение фликера и т.д. Силовой частью активного фильтра является трехфазный инвертор [9, 10]. Основным недостатком активных фильтров заключается в том, что они значительно сложнее и дороже пассивных компенсирующих устройств.

Поскольку гармоники порядка кратного трем во всех фазах тождественны, фильтр для их ослабления можно установить в нейтральном проводнике. Пассивные и активные силовые фильтры, включенные последовательно в нейтральный провод, рассмотрены в работах [1, 11, 12]. Такое решение позволяет удешевить АФ, т.к. его силовая часть представляет однофазный инвертор. В работе [12] рассмотрены стратегии управления АФ, обеспечивающие подавление гармоник тока кратных трем, либо третьей гармоники напряжения между нейтральными точками трехфазной сети.

Во многих случаях пассивные и активные фильтры используют одновременно. Такое сочетание активных и пассивных фильтров называют гибридными фильтрокомпенсирующими устройствами. Гибридные системы позволяют значительно уменьшить мощность активного фильтра и снизить за счет этого стоимость всего устройства. Важное достоинство гибридных фильтров заключается в том, что их можно использовать в сетях, где уже установлены ПФГ. В этом случае активный фильтр небольшой мощности используется для регулирования характеристик пассивных устройств.

В статье рассмотрен гибридный силовой фильтр для трехфазных четырехпроводных сетей, обеспечивающий компенсацию высших гармоник токов и напряжений, а также ослабление тока нейтрального проводника. Исследованы компенсационные характеристики фильтра при симметричном и несимметричном режимах работы сети.

Схема предлагаемого гибридного фильтра, включенного в трехфазную четырехпроводную сеть, показана на рис. 1. Нелинейной нагрузкой являются мостовые выпрямители, включенные в каждую из фаз.

Гибридный фильтр образован последовательным соединением пассивного и активного фильтров. Ветви пассивного фильтра ( $R_{пф}$  на рис. 1) представляют последовательные резонансные контуры, настроенные на частоты нечетных гармоник. Силовая часть активного фильтра представляет однофазный инвертор. Отличие предлагаемой конфигурации гибридного фильтра от известных [11, 12] заключается в том, что активный фильтр включен не в нейтральный провод, а между нейтральными точками пассивного фильтра и нелинейной нагрузкой.

Напряжение активного фильтра пропорционально току нейтрального провода:  $U_{аф} = R(\omega)I_N$ . На рис. 1 АЦП – аналого-цифровой преобразователь, СУ – система управления активным фильтром.

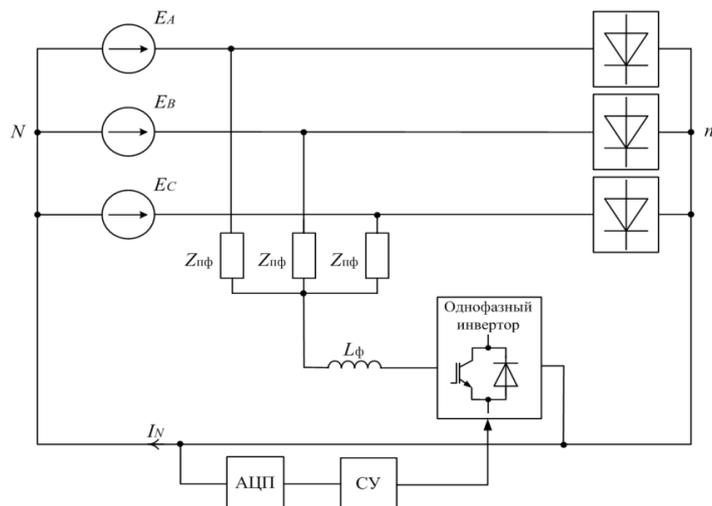


Рис. 1. Схема гибридного фильтра

Управляющий параметр АФГ  $R(\omega)$  имеет частотную характеристику идеального режекторного фильтра, настроенного на частоту сети  $\omega_c$ :

$$R(\omega) = R_{\text{аф}}, \quad \omega \neq \omega_c;$$

$$R(\omega) = 0, \quad \omega = \omega_c.$$

Таким образом, спектр напряжения активного фильтра не содержит составляющих с частотой основной гармоники. Это позволяет существенно уменьшить мощность активного фильтра, т.к. для спектральных составляющих с частотой основной гармоники он эквивалентен короткому замыканию.

Важным достоинством предлагаемого устройства является его относительно невысокая стоимость, поскольку для силовой части активного фильтра необходим всего один однофазный инвертор.

Рассмотрим компенсационные характеристики предлагаемого гибридного фильтра. Схема замещения трехфазной сети для токов и напряжений  $k$ -й гармоники показана на рис. 2. Источником высших гармоник является нелинейная нагрузка, представленная источниками тока. Активный фильтр представлен управляемым источником напряжения.

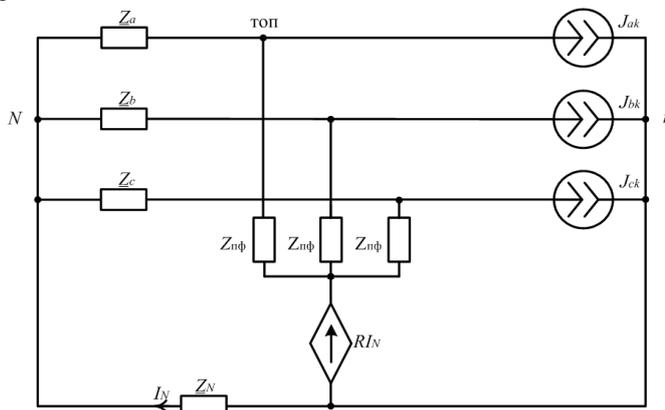


Рис. 2. Схема замещения трехфазной сети

В схеме на рис. 2 напряжение  $k$ -й гармоники между нейтральными точками

$$\dot{U}_{nNk} = \frac{Z_N Z_{\text{пф}} (\dot{J}_{ak} + \dot{J}_{bk} + \dot{J}_{ck})}{Z_c + Z_{\text{пф}} + 3(Z_N + R_{\text{аф}})}. \quad (1)$$

Здесь  $\dot{J}_{ak}$  – ток  $k$ -й гармоники в фазе  $A$ ;  $Z_{\text{пф}}$ ,  $Z_c$  и  $Z_N$  – комплексные сопротивления соответственно пассивного фильтра, фазных и нейтрального проводника на частоте  $k$ -й гармоники.

Ток нейтрального проводника

$$\dot{I}_N = \frac{\dot{U}_{nN}}{Z_N} = \frac{Z_{\text{пф}} (\dot{J}_{ak} + \dot{J}_{bk} + \dot{J}_{ck})}{Z_c + Z_{\text{пф}} + 3(Z_N + R_{\text{аф}})}. \quad (2)$$

Из формул (1)–(2) следует, что для токов и напряжений высших гармоник действие активного фильтра эквивалентно включению резистора  $R_{\text{аф}}$  последовательно с сопротивлением нейтрального провода  $Z_N$ . Это способствует ослаблению высших гармоник тока в нейтральном проводнике. Вместе с тем, активный фильтр не влияет на составляющие токов и напряжений, имеющих частоту основной гармоники.

Гармоники порядка, кратного 3, во всех фазах тождественны. Поэтому для составляющих токов и напряжений, имеющих частоту третьей гармоники, формулы (1)–(2) примут вид:

$$U_{nN} = \frac{3Z_N Z_{\text{пф}} J_3}{Z_c + Z_{\text{пф}} + 3(Z_N + R_{\text{аф}})},$$

$$I_N = \frac{U_{nN}}{Z_N} = \frac{3Z_{\text{пф}} J_3}{Z_c + Z_{\text{пф}} + 3(Z_N + R_{\text{аф}})}.$$

Напряжение  $k$ -й гармоники в точке подключения нелинейной нагрузки и пассивного фильтра

$$U_{\text{топ}} = \frac{Z_c I_N}{3} = \frac{Z_c Z_{\text{пф}} J_3}{Z_c + Z_{\text{пф}} + 3(Z_N + R_{\text{аф}})}.$$

Из приведенных соотношений следует, что для снижения уровня высших гармоник токов и напряжений необходимо увеличивать параметр  $R_{\text{аф}}$ . Однако при этом возрастает мощность активного фильтра. Значение  $R_{\text{аф}}$  целесообразно выбирать таким, чтобы обеспечивался минимум критерия

$$\Phi = \mu_1 \Phi_1^2 + \mu_2 \Phi_2^2. \quad (3)$$

Критерии  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  определяются выражениями:

$$\Phi_1 = \frac{I_{\text{ГФ}}}{I_{\text{ПФ}}}, \quad \Phi_2 = \frac{S_{\text{АФ}}}{S_{\text{ПФ}}}.$$

Здесь  $I_{\text{ПФ}}$  и  $I_{\text{ГФ}}$  – ток в нейтральном проводе при действии только ПФ и при действии гибридного фильтра соответственно;  $S_{\text{АФ}}$  и  $S_{\text{ПФ}}$  – мощности активного и пассивного фильтров. Весовые коэффициенты  $\mu_1$  и  $\mu_2$  учитывают важность частных критериев  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ :  $w_1 + w_2 = 1$ . Для определения весовых коэффициентов можно

использовать методы многокритериального выбора, например метод  $t$ -упорядочения [13]. Выбор параметра  $R_{аф}$  по критерию (3) обеспечивает компромисс между требованиями к ослаблению тока нейтрального провода и к мощности активного фильтра.

Для исследования характеристик предложенного фильтра была использована модель, реализованная в системе *Matlab* (рис. 3). Параметры модели сети: сопротивление сети  $R_c = 5$  Ом, индуктивность  $L_c = 0,15$  мГн, параметры выпрямителей: сопротивление нагрузки  $R_H = 25$  Ом, емкость сглаживающего фильтра  $C = 1500$  мкФ. Мощность нагрузки  $S_H = 3,4$  кВА.

Пассивный фильтр содержит параллельные ветви, настроенные на частоты 3 и 5 гармоник. Параметр активного фильтра  $R_{аф}$  выбран равным 15 Ом.

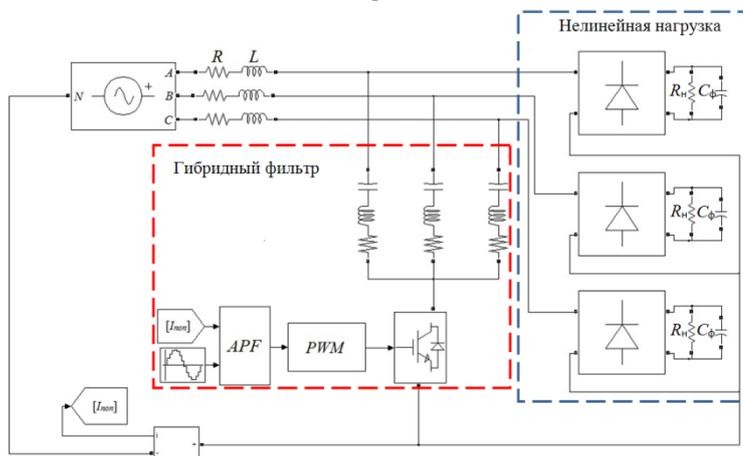


Рис. 3. Модель гибридного фильтра в системе *Matlab*

Проанализируем работу фильтра при симметричной и несимметричной нагрузках.

#### Случай 1. Симметричная нагрузка

На рис. 4 показана кривая тока в нейтральном проводе. Пассивный фильтр включается в момент  $t = 0,2$ с. При  $t = 0,4$ с включается активный фильтр.

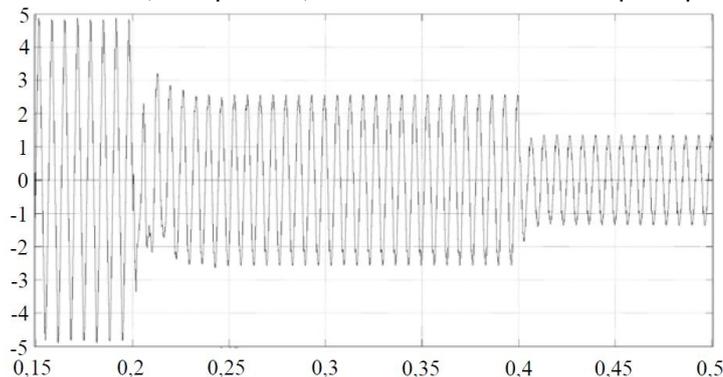


Рис. 4. Ток в нейтральном проводе (симметричная нагрузка)

На рис. 5 показан спектр тока  $I_N$  для различных режимов работы фильтра.

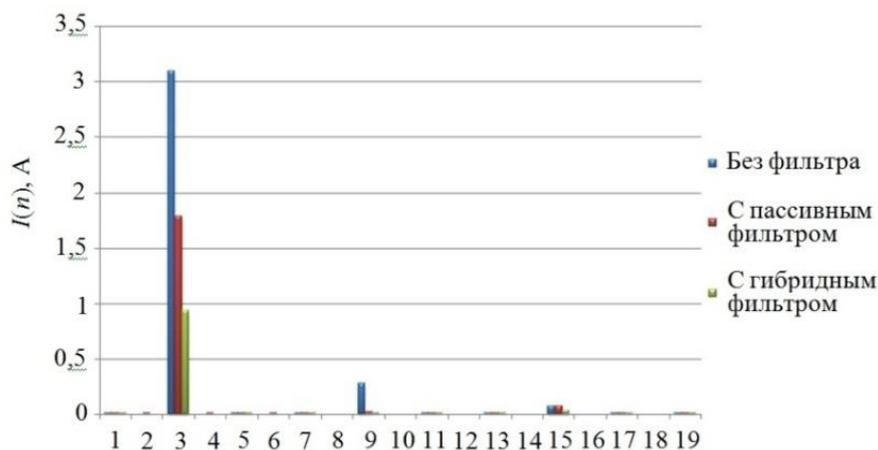


Рис. 5. Спектр тока в нейтральном проводнике (симметричная нагрузка)

Спектр фазного напряжения в точке общего присоединения нелинейной нагрузки и пассивного фильтра показан на рис. 6.

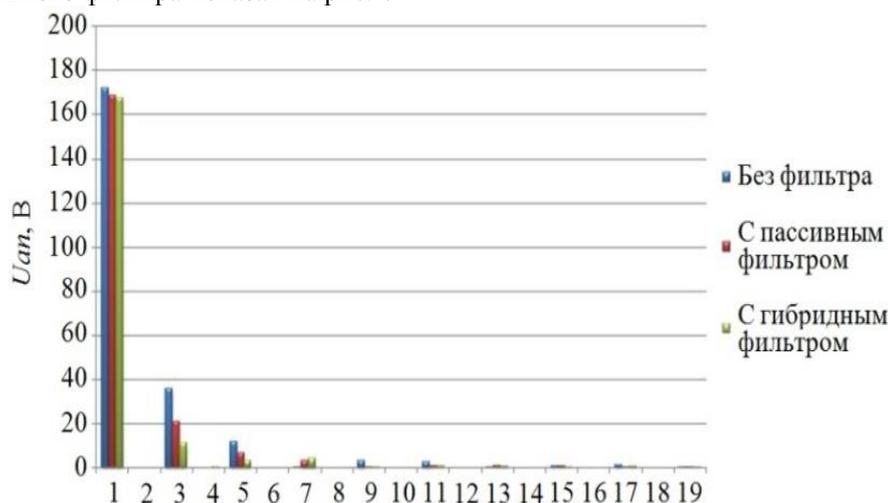


Рис. 6. Спектр фазного напряжения в точке общего присоединения (симметричная нагрузка)

Результаты моделирования показывают, что гибридный фильтр эффективно ослабляет ток нейтрального проводника, а также уменьшает составляющие напряжения в точке общего присоединения, имеющие частоту третьей и пятой гармоник. После включения фильтра действующее значение тока  $I_N$  уменьшилось более чем в 3 раза: с 3,1 до 0,9 А. Суммарный коэффициент гармоник напряжения в точке общего присоединения уменьшился с 22,12 до 7,31%. Мощность активного фильтра не превышает 10% от мощности пассивного фильтра, настроенного на 3 и 5-ю гармоники.

### Случай 2. Несимметричная нагрузка

Для исследования характеристик предложенного фильтра при несимметричном режиме были изменены параметры выпрямителя в фазе  $A$ : сопротивление нагрузки  $R_H = 50$  Ом, емкость сглаживающего фильтра  $C = 1000$  мкФ. 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.

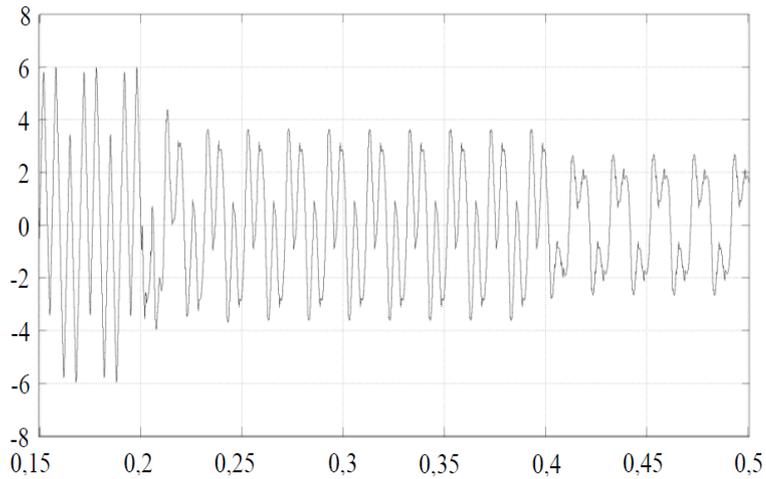


Рис. 7. Ток в нейтральном проводе (несимметричная нагрузка)

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

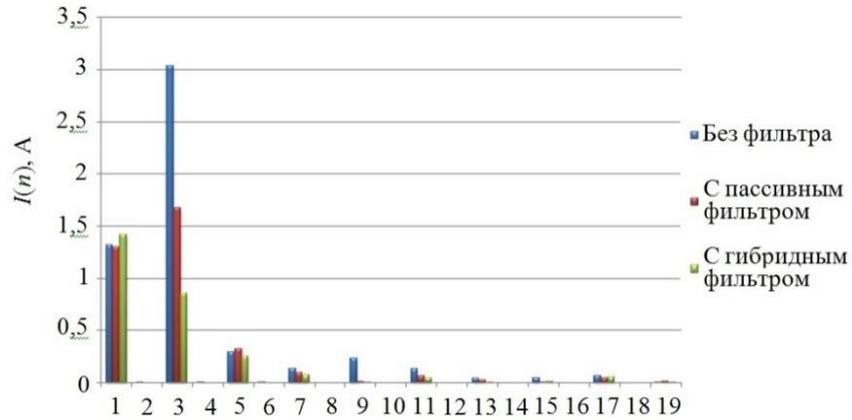


Рис. 8. Спектр тока в нейтральном проводнике (несимметричная нагрузка)

Спектр фазного напряжения в точке общего присоединения показан на рис. 9.

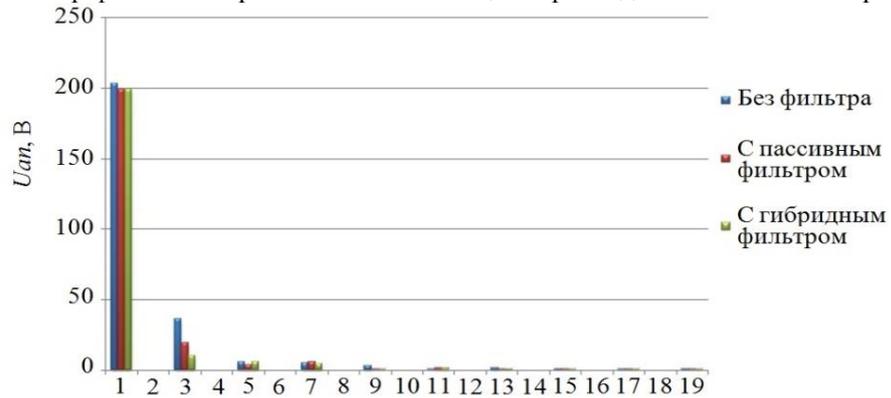


Рис. 9. Спектр фазного напряжения в точке общего присоединения (несимметричная нагрузка)

После включения фильтра действующее значение тока  $I_N$  уменьшилось в 2 раза: с 3,34 до 1,67 А. Суммарный коэффициент гармоник напряжения в точке общего присоединения после включения фильтра уменьшился с 18,22 до 6,45%.

Моделирование показало, что предлагаемый гибридный фильтр эффективно ослабляет гармоники тока нейтрального провода и при несимметричном режиме работы сети. Однако при выбранной стратегии управления активным фильтром предлагаемое устройство не влияет на составляющие тока  $I_N$  с частотой основной гармоники, вызванные несимметрией нагрузки.

### **Выводы**

В статье рассмотрена новая конфигурация гибридного фильтра, предназначенного для компенсации высших гармоник токов, а также ослабления токов в нейтральных проводниках трехфазных четырехпроводных сетей.

Исследованы характеристики фильтра для случаев симметричной и несимметричной нелинейной нагрузки. Анализ показал, что на частотах высших гармоник действие активного фильтра эквивалентно включению сопротивления  $R_{аф}$  последовательно с сопротивлением нейтрального провода. Моделирование показало, что предложенный гибридный фильтр эффективно ослабляет высшие гармоники тока нейтрального проводника и напряжения между нейтральными точками как в симметричной, так и несимметричной трехфазной цепи.

Важным достоинством фильтра является его невысокая стоимость. Для реализации силовой части фильтра необходим однофазный инвертор. Анализ показывает, что возможна независимая работа пассивного фильтра при отключенном АФ.

### **Summary**

*Neutral-line overloading is a serious problem for three-phase distribution systems. In this paper, a hybrid power filter is considered, suppressing neutral-line current harmonics in three-phase four-wire networks. The hybrid filter consists of a series connected passive power filter and a single-phase power converter. Simulation results confirm that the proposed hybrid filter can effectively mitigate neutral-line current harmonics whether the loads are balanced or not.*

**Key words:** hybrid power filters, harmonics, three-phase four-wire systems.

### **Литература**

1. Lai J.-S., Key T. Effectiveness of harmonic mitigation equipment for commercial office buildings. – IEEE trans. on Industry Applications, 1997, Vol. 33, No. 4, pp. 1104–1110.
2. Watson N., Scott T., Hirsch J. Implication for distribution networks of high penetration of compact fluorescent lamps. IEEE transactions on power delivery, Vol. 24, No. 3, 2009, pp. 1521–1528.
3. Темербаев С.А., Боярская Н.П., Довгун В.П. Анализ качества электроэнергии в городских распределительных сетях 0,4 кВ // Журнал Сибирского федерального университета. Серия техника и технологии. 2013. № 1. С. 107–120.
4. Тульский В.Н., Карташев И.И. и др. Влияние высших гармоник тока на режимы работы кабелей распределительной сети 380 В // Промышленная энергетика. 2013. № 5. С. 39–44.
5. Вагин Г.Я., Севостьянов А.А., Солнцев Е.Б., Терентьев П.В. К вопросу о выборе нулевых проводников в городских электрических сетях // Промышленная энергетика. 2014. № 2. С. 22–25.
6. Шидловский А.К., Жаркин А.Ф. Высшие гармоники в низковольтных электрических сетях. Киев. «Наукова думка». 2006. 210 с.

7. Управление качеством электроэнергии / И.И. Карташев, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов и др.; под ред. Ю.В. Шарова. М.: Издательский дом МЭИ, 2006. 320 с.

8. De Lima Tostes M., Bezerra U., Silva R. Impacts over distribution grid from the adoption of distributed harmonic filters on low-voltage customers. – IEEE transactions on power delivery, vol. 20, No. 1, 2005, pp. 384 – 389.

9. Vodyakho O., Kim T. Shunt active filter based on three-level inverter for three-phase four-wire systems. IET Power Electron., 2009, Vol. 2, Iss. 3, pp. 216–226.

10. Vodyakho, O., Mi, C.C. Three-level inverter-based shunt active power filter in three-phase three-wire and four-wire systems, IEEE Trans. Power Electron., 2009, 24, (5), pp. 1350–1363.

11. Enjeti, P. N., Shireen, W., Packebush, P., Pitel, I. J. Analysis and design of a new active power filter to cancel neutral current harmonics in three-phase four-wire electric distribution systems, IEEE Trans. Ind. Appl., 1994, 30, (6), pp. 1565–1572.

12. Inoue S., Shimizu T., Wada K., Control methods and compensation characteristics of a series active filter for a neutral conductor, IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 54, no. 1, pp. 433–440, Feb. 2007.

13. Черноуцкий И. Г. Методы принятия решений. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 416 с.

*Поступила в редакцию*

*18 февраля 2016 г.*

**Чернышов Максим Олегович** – аспирант Сибирского федерального университета. (СФУ), г. Красноярск. Тел.: 8(923)3648234. E-mail: chernyshov.m.o@gmail.com.

**Довгун Валерий Петрович** – д-р техн. наук, профессор кафедры «Системы автоматизации, автоматизированного управления и проектирования» Сибирского федерального университета (СФУ), г. Красноярск; член-корреспондент Академии электротехнических наук РФ. Тел.: 8(913)5190796. E-mail: vdovgun@sfu-kras.ru.

**Малошенко Ольга Евгеньевна** – магистр кафедры «Информационные системы и технологии (в энергетике)» Сибирского федерального университета, института космических и информационных технологий (СФУ, ИКИТ), г. Красноярск. Тел.: 8(902)9176321.