

МОНИТОРИНГ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В КОНФЛИКТНЫХ СИТУАЦИЯХ

Максимов Ю.В., Максимов Д.Ю., Легович Ю.С.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН

jhanjaa@ipu.ru, dmmmax@inbox.ru, legov@ipu.ru

Аннотация. Приводится обоснование необходимости постоянного мониторинга такого показателя качества электроэнергии, как уровень гармонических составляющих. Предлагается подход к проектированию фильтров сетевых гармоник и способ реализации мониторинга их уровня в поставляемой электроэнергии с определением источника их возникновения (возрастания).

Ключевые слова: качество электроэнергии, мониторинг качества электроэнергии, фильтры гармоник.

Введение

С развитием электроэнергетических сетей сформировались определенные требования к качеству электроэнергии, предлагаемой поставщиками потребителям. Были сформулированы (введены) определенные показатели качества электроэнергии и соответствующие критерии (нормы), которым эти показатели должны удовлетворять в тех или иных ситуациях. Эти нормы закреплены в государственных и международных стандартах (документах) на каждом уровне сетевой инфраструктуры (например, для низковольтных сетей общего пользования межгосударственный стандарт ГОСТ 32144-2013 [1] или европейский региональный стандарт IEC61000-3-12 [2]) и отражаются в договорах о поставке электроэнергии между энергетическими компаниями и потребителями. Причем определенные обязательства по выполнению требований к качеству электроэнергии возлагаются как на поставщиков, так и на потребителей энергии. Эти обязательства требуют применения специальных мер обеими сторонами (обеими участниками договора), что требует определенных дополнительных (и нежелательных ни для кого) затрат. Так что вопрос о виновнике (причине) снижения качества поставляемой электроэнергии, в ряде случаев совсем не очевидный, особенно в случае, когда к одному источнику подключены несколько потребителей, приобретает характер материальной ответственности. Средством разрешения такого рода конфликтов может стать непрерывный мониторинг качества электроэнергии, позволяющий, в том числе, определить и причину снижения качества.

Среди различных показателей качества электроэнергии уровень гармонических составляющих представляет по ряду причин особый интерес для мониторинга. Прежде всего потому что повышенный уровень гармонических составляющих в низковольтных сетях создает помехи, негативным образом влияющие на работу подключенного к сети оборудования потребителей. Кроме того, возрастание уровня гармоник приводит к дополнительным потерям электроэнергии, за которые приходится платить. И наконец, потому что представляет определенные трудности решение вопроса о том, что является причиной (или кто является виновником) его повышения, или, иначе говоря, кто должен расплачиваться за несоблюдение условий договора. В связи с этим в данной статье акцентируется внимание лишь на мониторинге именно уровня гармонических составляющих в поставляемой энергии в сетях низкого напряжения, непосредственно используемых потребителями.

2 Фильтры гармоник в системе мониторинга качества электроэнергии

Основным источником гармоник в электросети являются нелинейные нагрузки, создаваемые оборудованием, подключаемым к сети потребителями. Эффективным средством снижения уровня гармоник в сети является применение специальных фильтров гармоник. Однако использование фильтров гармоник предполагает выполнение определенных требований, обусловленных в первую очередь спецификой нелинейной нагрузки. Эти требования формируют подход к разработке фильтров, пригодных к применению в рассматриваемых ситуациях. Предлагаемый в данной работе подход к проектированию фильтров гармоник заключается в использовании фильтров-прототипов низких частот, нагруженных, с одной стороны, [3], что вполне оправдано в случаях, когда сопротивление нагрузки фильтра значительно отличается от внутреннего сопротивления источника энергии. Для электросетей это условие выполняется.

В качестве примера нелинейной нагрузки рассмотрим трехфазный выпрямитель, наиболее часто используемый в силовых преобразователях. Применение простейшей фильтрации для снижения уровня гармоник, создаваемых такой нагрузкой при выделяемой ею мощности $P=20\text{кВт}$, описано в работе [4], что позволит оценить эффективность предлагаемого подхода к проектированию сетевых фильтров. В качестве фильтра гармоник в одной из рассмотренных в работе [4] топологий трехфазного выпрямителя используется дроссель переменного тока с индуктивностью $L=500\text{мкГн}$. На рис.1 представлены топологии такого выпрямителя без фильтра (А) и с фильтром (В).

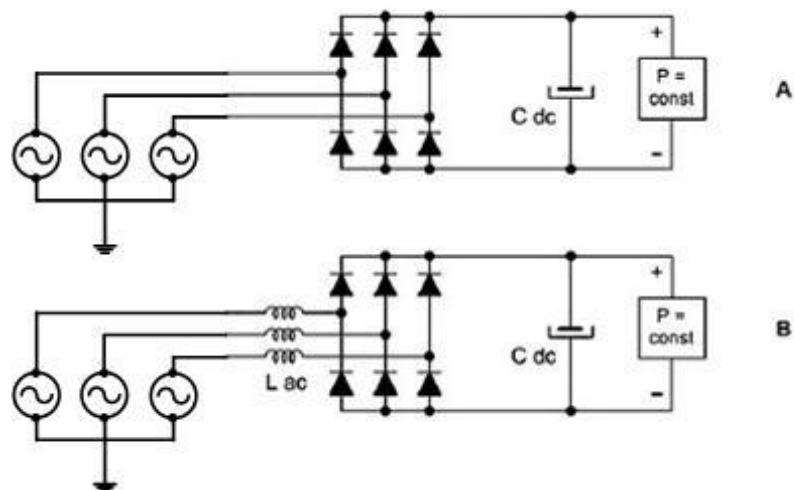


Рис. 1.

В соответствии с предлагаемым подходом к проектированию сетевых фильтров эту индуктивность можно рассматривать как элемент фильтра низких частот (ФНЧ), нагруженного, с одной стороны, [3], поскольку сопротивление нагрузки, которым в данном случае является входное сопротивление выпрямителя, значительно превосходит сопротивление источника, т.е. внутреннее сопротивление электросети. (Именно малое внутреннее сопротивление сети обеспечивает слабую зависимость напряжения в сети от изменения подключаемой нагрузки).

Рис.2, заимствованный из работы [4] иллюстрирует соотношение гармоник в сети в рассматриваемых случаях. На рисунке в таблицах приведены фактические значения гармоник в сети, значения суммарного коэффициента гармоник THD и частично взвешенного коэффициента гармонических искажений PWHD, а также значения указанных величин, допускаемые стандартом (IEC61000-3-12). Указано и значение параметра R_{sc} , характеризующего поведение сети в режиме короткого замыкания.

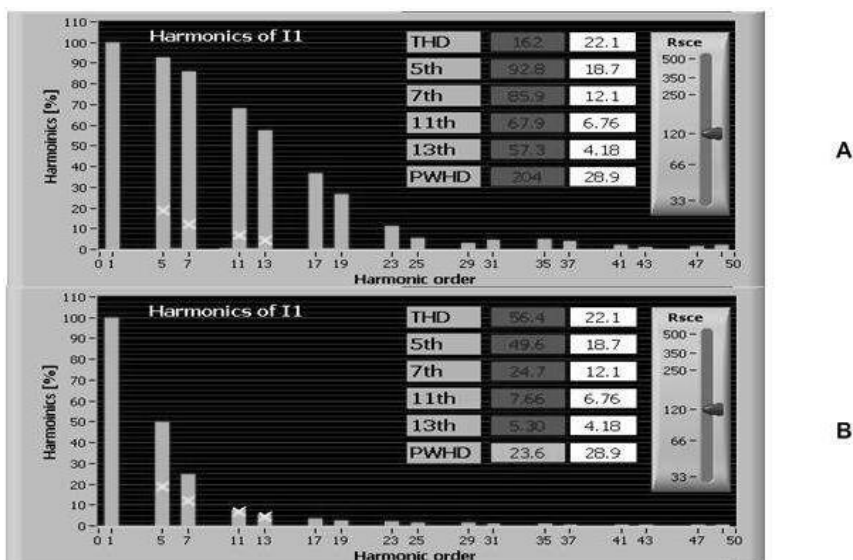


Рис. 2.

Частота среза фильтра в данном случае может быть определена из сравнения уровней гармоник в двух случаях, а именно, при наличии в схеме выпрямителя индуктивности L и при ее отсутствии. Так если при отсутствии индуктивности уровень 5-ой гармоники составляет 0,92 от уровня 1-ой, то при наличии индуктивности соотношение между теми же гармониками составляет 0,495, что дает ослабление 5-ой гармоники в 1,9 раза. Частотная зависимость коэффициента передачи ФНЧ по напряжению K_u^l определяется выражением:

$$(1) \quad K_u^l = \frac{1}{1 + \left(\frac{f}{f_b}\right)^{2n}}$$

где символом f обозначается частота, индекс b относится к частоте среза, n – число элементов в ФНЧ.

Ослабление 5-ой гармоники в 1,9 раза дает однозвенный фильтр при частоте среза в $\sqrt{1,9-1} \approx 0,95$ раза меньшей, чем частота 5-ой гармоники, т.е. частота среза фильтра в данном случае будет равна $f_b \approx 265$ Гц.

Такой фильтр практически не подавляет ни 2-ую, ни 3-ю гармоники, что в данном случае и не требуется, поскольку они (и плюс еще 4-ая гармоника) фактически отсутствуют и без фильтра (не создаются выпрямителем). Но и 5-ая гармоника подавляется только до уровня 49,6%, в то время как стандарт допускает значение не более 18,7%. Т.е. такой индуктивности явно недостаточно. В цитируемой работе не предлагается дополнительных мер по дальнейшему снижению уровня гармоник в данном случае. Хотя выход очевиден – или увеличить индуктивность, или использовать фильтр с большим числом элементов. Увеличение индуктивности (вдвое) приведет к уменьшению частоты среза в 2 раза, т.е. до 132,5 Гц. При этом увеличится влияние фильтра на передачу энергии на частоте 50 Гц, что нежелательно (ведет к потерям). Двухзвенный фильтр с максимально плоской частотной характеристикой даст ослабление 5-ой сетевой гармоники в 5 раз (до уровня, требуемого стандартом) при снижении частоты среза (и увеличении индуктивности) только в $\sqrt{2}$ раз, но потребуются добавить к каждой индуктивности параллельную емкость $C \approx 1600$ мкФ. 3-х фазный выпрямитель с двухзвенным LC фильтром переменного тока показан на рис.3.

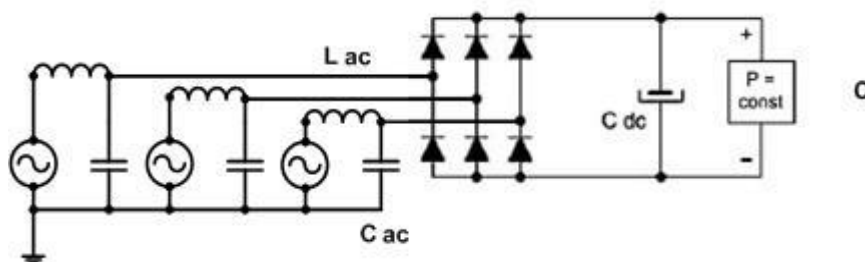


Рис. 3.

В рассматриваемом примере емкости фильтра могут быть включены и по схеме «треугольник», и в этом случае их номинал уменьшится вдвое при увеличении рабочего напряжения на них в $\sqrt{3}$ раза. Включение емкостей фильтра «треугольником» показано на рис.4.

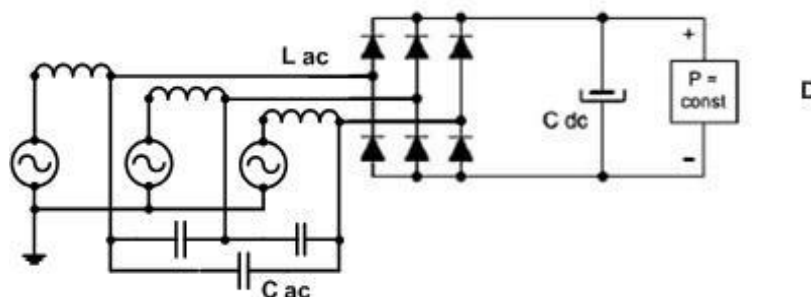


Рис. 4

Таким образом, правильно спроектированный фильтр гармоник с одной стороны обеспечивает выполнение требований стандарта качества электроэнергии по уровню сетевых гармоник, а с другой стороны позволяет определить, с какой стороны фильтра эти гармоники образуются (где их уровень выше: со стороны источника электроэнергии или со стороны нагрузки). Что заставляет при

мониторинге качества электроэнергии контролировать уровень гармоник с двух сторон фильтра. Необходимо, однако, обратить внимание еще на один аспект проектирования фильтров гармоник.

3 Особенности применения фильтров гармоник

Приведенные в рассмотренном примере значения элементов фильтра рассчитаны для случая, когда мощность выпрямителя составляет 20 кВт. При другой нагрузке (другой мощности или с другим характером нелинейности) может потребоваться и другой фильтр (с другой частотой среза, с необходимостью подавления других гармоник). Так если в приведенном примере не требовалось подавлять гармоники ниже 5-ой, и допустимо было использовать двухзвенный фильтр с частотой среза 187Гц, то при необходимости подавления гармоник меньшего порядка придется снижать и частоту среза фильтра, а может быть и усложнять схему фильтра. При снижении частоты среза фильтра гармоник становится необходимым принимать специальные меры по компенсации реактивных составляющих входной проводимости фильтра. (В случае, рассмотренном в работе [4], когда частота среза фильтра гармоник составляла 265Гц, такой компенсации не требовалось в силу того, что как отмечено в упомянутой работе, реактивные составляющие тока основной гармоники в рассматриваемом случае пренебрежимо малы). При использовании фильтров, нагруженных, с одной стороны, компенсация реактивной составляющей тока основной гармоники ($\text{Im}I_1$), появление которой обусловлено реактивной составляющей входной проводимости фильтра гармоник ($\text{Im}Y$), может быть реализована следующим образом. На входе фильтра низких частот (ФНЧ) параллельно ему устанавливается фильтр высоких частот (ФВЧ) таким образом, что оба фильтра образуют диплексер со смежными полосами пропускания [5]. При определенном выборе элементов ФВЧ реактивная составляющая его входной проводимости ($\text{Im}Y^h$) полностью компенсирует реактивную составляющую входной проводимости ФНЧ ($\text{Im}Y^l$). Наилучшая взаимная компенсация реактивных составляющих входных проводимостей фильтров достигается в случае расчета значений элементов фильтров, обеспечивающих максимально плоские частотные характеристики обоих фильтров. Выход ФВЧ (нагруженный определенным образом) может быть использован для мониторинга гармонических составляющих на входе ФНЧ. Пример структуры двухзвенных фильтров для одной фазы показан на рис.5.

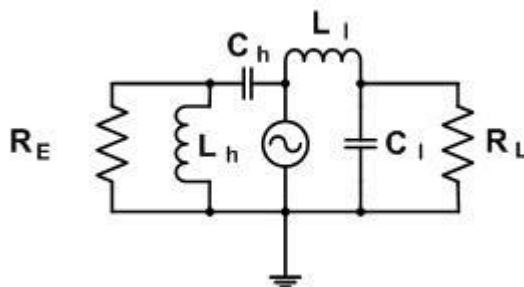


Рис. 5.

На рис.5 реактивные элементы ФНЧ отмечены индексом **l**, а соответствующие элементы ФВЧ – индексом **h**. Нагрузка ФНЧ обозначена – R_L , нагрузка ФВЧ – R_E . Источник электроэнергии обозначен – **G**.

Если частотная характеристика ФНЧ определяется выражением 1, то частотная зависимость коэффициента передачи ФВЧ по напряжению K_u^h (сопряженного с ФНЧ, т.е. с такой же частотой среза) определяется выражением:

$$(2) \quad K_u^h = \frac{1}{1 + \left(\frac{f_b}{f}\right)^{2n}}$$

Для данных, соответствующих рассмотренному примеру, на рис.6 приведены расчетные частотные характеристики фильтров.

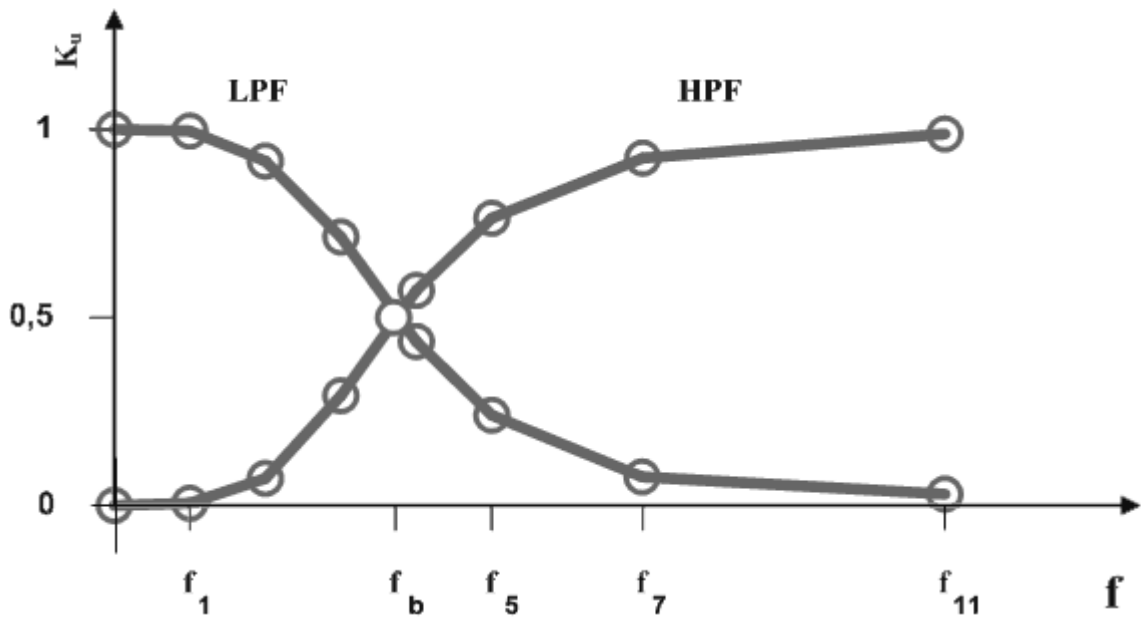


Рис. 6.

На рис.6 символом f обозначается частота, индекс b относится к частоте среза, индексом 1 обозначена частота основной гармоники (частота сети), индексами $5, 7, 11$ обозначены соответствующие гармонические составляющие. Англоязычные сокращения LPF и HPF соответствуют русским ФНЧ и ФВЧ.

Для двухзвенных ФНЧ и ФВЧ и образованного этими фильтрами диплексера на рисунке 7 показаны соответственно реактивные составляющие их входных проводимостей.

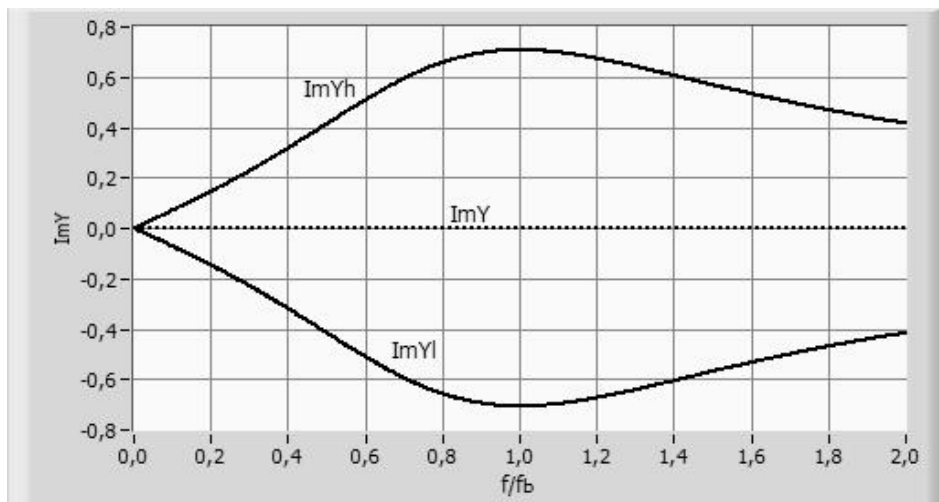


Рис. 7.

На рис.7 сплошными линиями показаны частотные зависимости реактивных составляющих входных проводимостей ФНЧ и ФВЧ, обозначенных на рисунке ImY^l и ImY^h соответственно, а пунктирной линией – их сумма, т.е. частотная зависимость реактивной составляющей диплексера, обозначенная ImY . Действительно в идеальном случае имеет место полная компенсация реактивных составляющих ФНЧ и ФВЧ.

Что касается частотных зависимостей активных составляющих проводимостей фильтров, нагруженных, с одной стороны, то они совпадают с АЧХ фильтров. Показательно, что активная составляющая входной проводимости диплексера со смежными полосами пропускания не зависит от частоты и равна проводимости нагрузки (при чисто активном ее характере).

Остается обсудить вопрос о взаимных обязательствах (и ответственности) поставщика и потребителей электроэнергии в области обеспечения требований стандартов качества по допустимому уровню сетевых гармоник.

4 Организационные вопросы

Обратимся к обобщенной схеме подключения потребителей к электросети, представленной на рис.8.

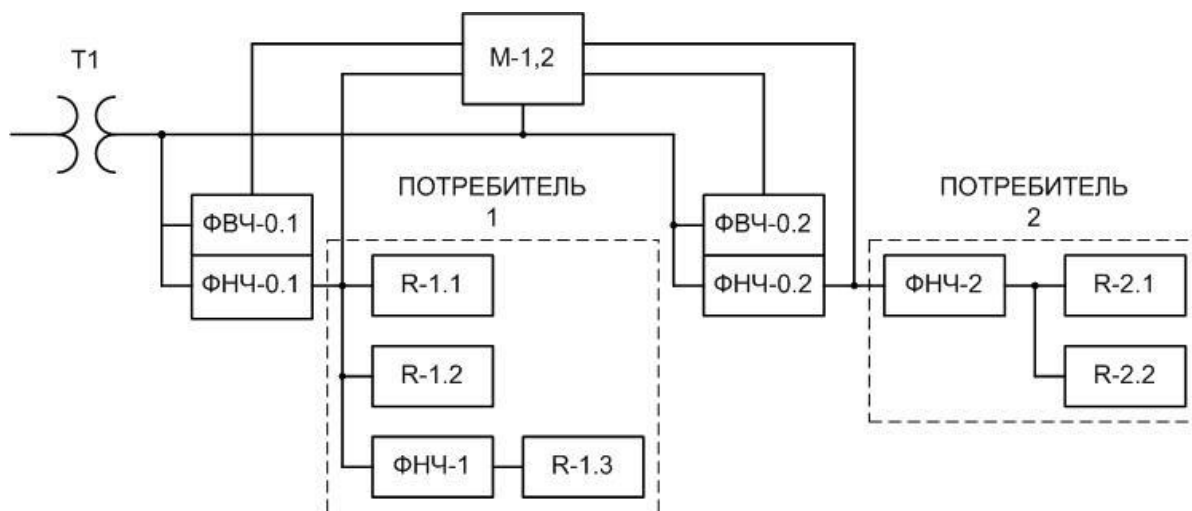


Рис. 8.

Рис.8 иллюстрирует случай, когда к одному источнику, представленному трансформатором Т1, подключены два потребителя, каждый из которых подключает к источнику (электросети) нелинейную нагрузку. В данном примере это нагрузка R-1.3 первого потребителя и нагрузки R-2.1 и R-2.2 второго потребителя. Чтобы исключить попадание в сеть образующихся на этих нагрузках гармонических составляющих, снижающих качество электроэнергии, потребители обязаны принять меры по подавлению создаваемых ими помех. С этой целью устанавливаются соответствующие фильтры гармоник: ФНЧ-1 устанавливается первым потребителем и ФНЧ-2 – вторым. Потребитель 1, подавляя помехи, создаваемые нагрузкой R-1.3, защищает и другое свое оборудование - нагрузки R-1.1 и R-1.2. Если фильтры подобраны правильно, нагрузки R-1.1 и R-1.2 линейны, и поставщик обеспечивает требуемое качество электроэнергии, то конфликтов не возникает. В противном случае они могут возникнуть. И чтобы разобраться, в чем причина недопустимого повышения уровня гармоник в сети, поставщик, со своей стороны, должен принять соответствующие меры, осуществляя мониторинг с использованием соответствующего оборудования М-1,2 и фильтров ФНЧ-0.1, ФВЧ-0.1, ФНЧ-0.2 и ФВЧ-0.2. Следует отметить, что требования к фильтрам потребителей, с одной стороны, и фильтрам поставщика, с другой, существенно различаются в связи с разным их назначением: одни должны подавить гармоники, другие – позволить уловить их разницу на входе и выходе фильтра.

Заключение

В заключение отметим, что требования к качеству электроэнергии формируются исходя из необходимости обеспечить электромагнитную совместимость при работе различного оборудования, подключаемого к сети потребителями. Эти требования регламентируются соответствующими стандартами и находят отражение в договорах на поставку электроэнергии различным потребителям, что обуславливает необходимость постоянного мониторинга качества поставляемой электроэнергии. Среди контролируемых параметров качества электроэнергии не последнюю роль играет уровень сетевых гармоник, для подавления (фильтрации) которых необходимо применять специальные меры. Определенные меры должны быть приняты и при мониторинге уровней гармонических составляющих в сети. Авторы надеются, что предложенные в данной работе подходы к решению этих вопросов помогут и разработчикам сетевых фильтров гармоник, и организаторам мониторинга качества электроэнергии обеспечить бесконфликтное взаимодействие поставщиков электроэнергии и ее потребителей.

Литература

1. ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Электромагнитная совместимость технических средств. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. // <http://docs.cntd.ru/document/1200104301>

2. *IEC 61000-3-12: Electromagnetic compatibility (EMC), Part 3-12: Limits for harmonics current produced by equipment connected to public low-voltage systems with input current > 16A and < 75A per phase.* // IEC. Dec. 2011. <https://webstore.iec.ch/publication/4144>
3. *Маттей Д.Л., Янг Л., Джонс Е.М.Т. Фильтры свч, согласующие цепи и цепи связи, т.1.* – М.: Связь. 1971. – 439с.
4. *Pietkiewicz A., Melly S. Proper selection of passive and active power quality filters for the mitigation of mains harmonics* // Jan. 2009. <https://www.edn.com/design/power-management-design/4019563/Proper-selection-of-passive-and-active-power-quality-filters-for-the-mitigation-of-mains-harmonics>
5. *Маттей Д.Л., Янг Л., Джонс Е.М.Т. Фильтры свч, согласующие цепи и цепи связи, т.2.* – М.: Связь. 1972. – 495с.