

ГАРМОНИЧЕСКИЕ ИСКАЖЕНИЯ ПРИ РАБОТЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ

Представленный в статье материал по гармоническим искажениям носит практический, прикладной характер. Он базируется на многолетнем опыте работы компании «Веспер» в области производства, поставки и обслуживания преобразователей частоты. В статье приведены примеры расчета коэффициентов гармоник при работе преобразователей частоты и выбора дополнительных устройств для снижения гармонических составляющих.



1. ЧТО ТАКОЕ ГАРМОНИЧЕСКИЕ ИСКАЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОСЕТИ

Параметры промышленной питающей электросети должны соответствовать требованиям ГОСТ 13109-97 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электроэнергии в системах электроснабжения общего назначения». Реальная электрическая сеть и ее параметры отличаются от идеальных. Влияние различных факторов приводит к отклонению параметров сети от норм и ухудшению качества электроэнергии.

Параметры питающей сети, не соответствующие нормам (повышенное или пониженное напряжение, всплески и провалы напряжения, искажение синусоидальной формы напряжения и др.), воздействуя на подключенных электропотребителей, могут нарушать их нормальную работу, и даже выводить их из строя.

Среди показателей качества электроэнергии (КЭ) стандартом определены два параметра, характеризующие степень искажения формы синусоиды напряжения в электросети:

- коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения * K_U

$$K_U = \frac{\sqrt{U_{(2)}^2 + U_{(3)}^2 + \dots + U_{(40)}^2}}{U_{(1)}} \cdot 100, \%$$

где: $U_{(1)}$ – действующее значение междуфазного (фазного) напряжения 1-ой гармоники (основной частоты);

$U_{(2)}, U_{(3)} \dots U_{(40)}$ – действующие значения междуфазного (фазного) напряжения высших гармоник, кратных по частоте основной гармонике (при определении коэффициента искажения синусоидальности K_U стандарт предписывает

учитывать гармоники только от 2-ой до 40-й и не учитывать гармоники, уровень которых менее 0,1 %);

* Другие названия K_U – «коэффициент гармоник», «коэффициент нелинейных искажений». В иностранной литературе он обозначается как THD (Total Harmonic Distortion – коэффициент суммарных гармонических искажений).

- коэффициент n -ой гармонической составляющей напряжения

$$K_{U(n)} = \frac{U_{(n)}}{U_{(1)}} \cdot 100, \%$$

где: n – номер гармонической составляющей, кратной основной частоте, в спектре сетевого напряжения.

В результате сложения основной (1-ой) гармоники номинальной частоты питающей сети с появившимися по разным причинам высшими гармониками форма синусоиды искажается.

Таким образом, коэффициент искажения синусоидальности K_U определяет долю суммарного напряжения высших гармоник в питающем напряжении электросети по отношению к напряжению основной частоты, а коэффициент n -ой гармонической составляющей $K_{U(n)}$ характеризует вклад конкретной гармоники в общее искажение.

Согласно ГОСТ 13109-97, нормально допустимое значение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения для сетей напряжения 0,38 кВ составляет 8 %, предельно допустимое значение составляет 12 %.

Нормально допустимое значение коэффициента n -ой гармонической составляющей для каждой гармоники приведено в ГОСТ 13109-97, например, для 5-ой гармоники – 6,0 %, для 7-ой гармоники – 5 %

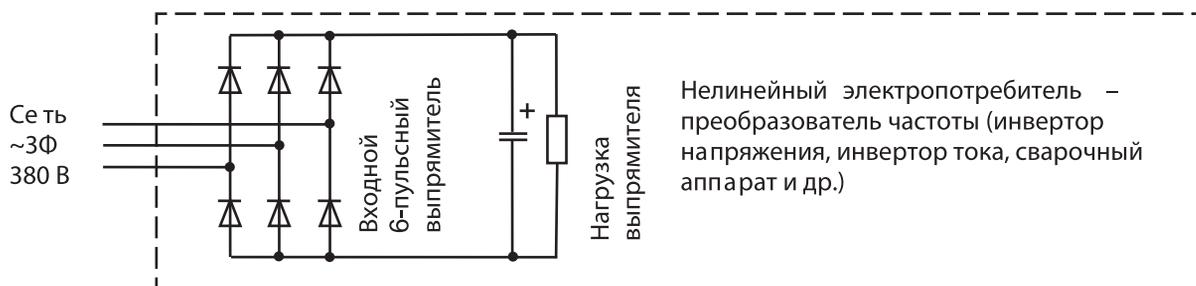


Рис. 1. Входной 6-пульсный выпрямитель электропотребителя трехфазной сети

и т.д. Предельно допустимое значение коэффициента n -ой гармонической составляющей для каждой гармоники в 1,5 раза больше нормально допустимого:
 $K_{U(n)пред} = 1,5 \cdot K_{U(n)норм}$

2. ПРИЧИНЫ И ИСТОЧНИКИ ГАРМОНИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ

Причинами появления высших гармоник являются подключенные к электросети потребители, имеющие нелинейные входные цепи и вследствие этого потребляющие импульсный ток. Нелинейный характер цепи определяется наличием в ней полупроводниковых нелинейных элементов (выпрямительных мостов, диодов, тиристоров и т.д.).

Развитие производства современных силовых полупроводниковых приборов ведет к возрастающему количеству приборов, управляемых тиристорами, конверторами (инверторами) и др.

Примеры нелинейных электропотребителей, являющихся причинами гармонических искажений:

- ◆ статические преобразователи (выпрямители, источники бесперебойного питания, тиристорные регуляторы, импульсные источники питания, преобразователи частоты, регулирующие скорость вращения электродвигателей переменного тока, и т.п.);
- ◆ газоразрядные осветительные устройства и электронные балласты;
- ◆ электродуговые печи постоянного и переменного тока;
- ◆ сварочные аппараты;
- ◆ устройства с насыщающимися электромагнитными элементами;
- ◆ специальные медицинские приборы и т.п.

Увеличивающаяся в последние годы тенденция широкого внедрения в самые разные отрасли промышленности нужных и полезных приборов – преобразователей частоты, являющихся для электросети нелинейными потребителями, – заставляет все больше обращаться к проблемам, связанным с гармоническими искажениями сетевого напряжения питания.

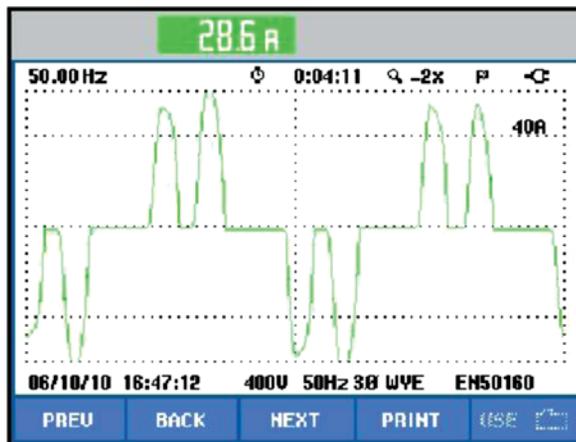


Рис. 2. Ток, потребляемый 6-пульсным выпрямителем преобразователя частоты (инвертора напряжения и др.) в трехфазной сети

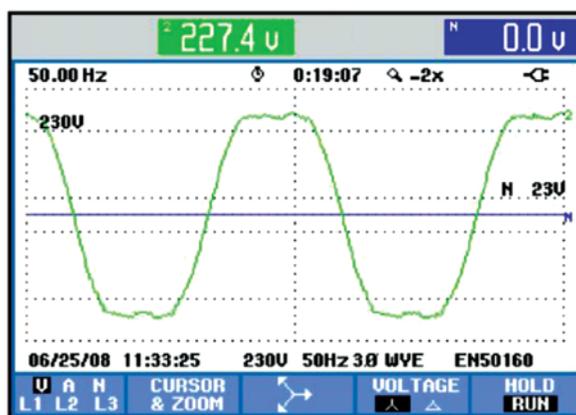


Рис. 3. Искажение формы синусоиды питающего напряжения при работе преобразователя частоты

3. ИСКАЖЕНИЕ СИНУСОИДЫ И СПЕКТР ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ РАБОТЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРОПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Синусоидальное переменное напряжение источника электропитания подается на устройство с нелинейной входной цепью – входной выпрямитель. Функция выпрямителя – преобразовать переменное

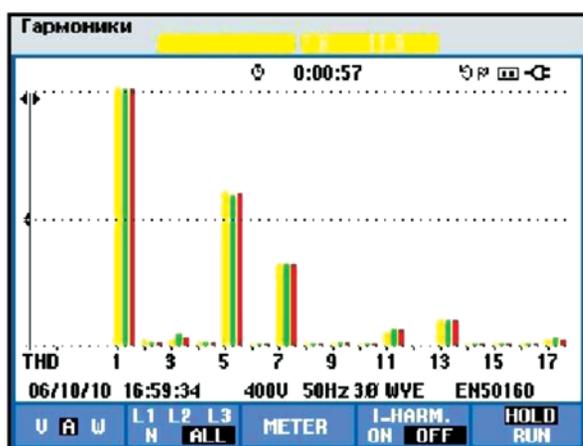


Рис. 4. Примерный вид спектра гармоник питающего напряжения при 6-пульсной выпрямительной схеме электропотребителя

разнополярное напряжение источника питания в однополярное (или пульсирующее) для дальнейшего превращения его в постоянное напряжение.

В трехфазных цепях переменного тока могут использоваться различные выпрямительные схемы. В настоящее время наиболее применима 6-полупериодная (6-пульсная) схема (рис. 1).

Другие схемы выпрямления, имеющие большее количество полупериодов выпрямления, например 12-пульсная, 18-пульсная схемы, также могут применяться для выпрямления переменного напряжения. Несомненное положительное качество этих схем – существенно уменьшенный уровень высших гармоник, генерируемых в сеть. Однако для их реализации требуются дополнительные трансформаторы питания (или специальные трансформаторы), увеличенное количество выпрямительных вентилей (диодов), что делает такие схемы сложными и экономически нецелесообразными. Они нашли применение, например, в высоковольтных (6 кВ, 10 кВ и др.) мощных преобразователях частоты.

В устройствах, питающихся от трехфазных источников переменного тока 0,4 кВ, практически везде применяются 6-пульсные выпрямители. Такие выпрямители имеются в преобразователях частоты, инверторах напряжения, инверторах тока, сварочных аппаратах и других приборах.

Синусоида напряжения, подаваемая на вход 6-пульсного выпрямителя, искажает свою форму, так как в момент протекания импульса тока увеличивается падение напряжения на внутреннем сопротивлении сети (пример искаженной формы синусоиды приведен на рис. 3).

Преобразователи частоты, имеющие входной трехфазный выпрямитель, выполненный по 6-пульсной схеме (рис. 1), потребляют импульсный ток, форма которого приведена на рис. 2.

Спектр гармоник питающего напряжения сети с нагрузкой, имеющей 6-пульсную схему выпрямителя, при симметричном режиме трехфазной сети содержит нечетные гармоники (четные гармоники при симметричном режиме взаимно компенсируются). Кроме того, при соединении фаз источника звездой линейное напряжение не содержит гармоник, кратных трем, так как эти гармоники, имеющиеся в фазных напряжениях, при вычитании также компенсируются [3].

Примерный вид спектра гармоник, создаваемого 6-пульсным выпрямителем в реальной трехфазной сети, приведен на рис. 4. Основной вклад в искажение синусоидальности напряжения сети при работе преобразователя частоты вносят 5-я, 7-я, 11-я и 13-я гармоники (т.е. 250, 350, 550 и 650 Гц соответственно).

4. ОТ ЧЕГО ЗАВИСИТ ИНТЕНСИВНОСТЬ ГАРМОНИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ НАПЯЖЕНИЯ ПИТАНИЯ

Интенсивность гармонических искажений напряжения питания при работе в электросети нелинейной нагрузки зависит:

1) от соотношения мощности питающего трансформатора и суммарной мощности нелинейных потребителей. Чем мощнее сеть по отношению ко всем нелинейным потребителям, тем меньше уровень гармонических искажений.

В пределах допустимого значения коэффициента искажения синусоидальности K_d , определенного ГОСТ 13109-97, к трехфазной сети может быть подключено сколько угодно нелинейных потребителей с суммарной мощностью, не превышающей, как правило, 10–15% от номинальной мощности источника питания [2].

Например, как это часто бывает, в начале модернизации производства на предприятии устанавливается несколько пробных преобразователей частоты, суммарная мощность которых не превышает нескольких процентов от номинальной мощности питающего трансформатора. Гармонические искажения, вносимые несколькими преобразователями в электросеть, при этом малы и не превышают допустимых значений. Приводы, оснащенные преобразователями частоты, теперь стали в электросети нелинейными потребителями. Другие потребители электросети и сама электросеть (подстанции, распределительные устройства и т.д.) практически не изменяют своих характеристик под воздействием появившихся высших гармоник ввиду их малого уровня. Осциллограф, подключенный к сети, показывает, что форма синусоиды напряжения также практически не искажена.

Для оценки уровня появившихся высших гармоник уже на этом этапе полезно подключить к электросети измеритель нелинейных искажений или анализатор качества электроэнергии (см. ниже п. 7.2).

После положительного опыта эксплуатации первых преобразователей частоты начинается их широкое внедрение в производство. Количество устанавливаемых и работающих одновременно преобразователей увеличивается. Подключение и ввод новых преобразователей частоты (новых нелинейных нагрузок) добавляет искажений в питающую электросеть, и коэффициент гармоник увеличивается.

При превышении суммарной мощности установленных преобразователей 10–15 % от номинальной мощности питающего трансформатора, уровень высших гармоник в сети увеличивается еще больше.

Уровень гармонических искажений может превысить допустимый уровень по ГОСТ 13109-97 (8 %), и уже возможно появление признаков влияния высших гармоник на других потребителей, например: сбой в работе приборов измерения и учета электроэнергии, наводки в телекоммуникационных и управляющих цепях и др. Форма синусоиды искажается, что может быть зафиксировано осциллографом.

В этих случаях рекомендуется проведение измерений гармонических искажений в электросети и принятие практических мер для снижения их уровня. Наибольший вклад в общие гармонические искажения вносят самые мощные преобразователи частоты. В этом можно убедиться, подключая поочередно каждый преобразователь к питающей электросети и измеряя создаваемый им коэффициент гармоник.

2) от протяженности и сечения линии питания от питающего трансформатора до потребителя.

Если бы сопротивление сети относительно зажимов каждого отдельного электропотребителя было равно нулю, то искажений синусоидальности напряжения не существовало бы.

В реальности сеть для любого электропотребителя представляет собой некое эквивалентное сопротивление, включающее выходное сопротивление питающего трансформатора и распределенное сопротивление питающей линии. Условия эксплуатации нелинейного потребителя на конкретном производстве, объекте, населенном пункте и др. могут увеличить сопротивление сети и тем самым ухудшить качество электроэнергии в части гармонических искажений [3].

Примером электросети с увеличенным сопротивлением может служить линия электропередачи ~380 В (~220 В) в сельской местности. Провода электропитания здесь имеют большую протяженность, в

результате чего увеличивается их электрическое сопротивление. Несинусоидальные токи, потребляемые нелинейным потребителем, подключенным к линии электропитания, протекая по этому сопротивлению, вызывают падение напряжения на нем тем больше, чем длиннее провода.

В результате на зажимах нелинейного электропотребителя, а также на зажимах всех остальных электропотребителей, включенных параллельно ему, появляется несинусоидальное напряжение.

5. СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ ГАРМОНИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ

5.1. Проектно-конструкционные решения

Выделение нелинейных нагрузок на отдельную систему шин (разделение линейных и нелинейных нагрузок).

Снижение полного сопротивления распределительной сети. Это один из эффективных методов снижения нелинейных искажений. Кабели и сборные шины имеют полное сопротивление, имеющее в значительной степени индуктивный характер. Увеличение сечения кабелей (проводов) снижает активное сопротивление распределительной сети, но не снижает ее индуктивность. Максимальное эффективное сечение жил кабелей (проводов) составляет приблизительно 95 мм² [4]. С дальнейшим увеличением сечения кабелей их индуктивность остается относительно постоянной. Более эффективным является использование параллельно соединенных кабелей (проводов).

Применение 12-пульсного выпрямителя. Например, для снижения величины коэффициента искажения синусоидальности токов трехфазных источников бесперебойного питания (ИБП) до уровня менее 10 % используют 12-полупериодные выпрямители [3]. Применение 12-пульсного выпрямителя позволит полностью подавить 5-ю и 7-ю гармоники в питающем токе выпрямителя [10].

Подключение нелинейной нагрузки к системе с большей мощностью короткого замыкания. Практически это означает замену трансформатора питания на более мощный.

Обеспечение симметричного режима работы трехфазной системы. Необходимо добиться, насколько это возможно, сбалансированности нагрузок по фазам. При этом обеспечивается минимальный ток в проводнике нейтрали и минимальное содержание гармоник в выходном напряжении источника бесперебойного питания (в случае его применения, например, для питания компьютера).

5.2. Применение фильтрующих устройств подавления гармоник

Включение линейных дросселей

Последовательное включение линейных дросселей переменного тока (рис. 5) является простейшим способом снижения уровня генерируемых нелинейными нагрузками высших гармоник во внешнюю сеть. Дроссель имеет малое значение индуктивного сопротивления на основной частоте 50 Гц и значительные величины сопротивлений для высших гармоник, что приводит к их ослаблению.

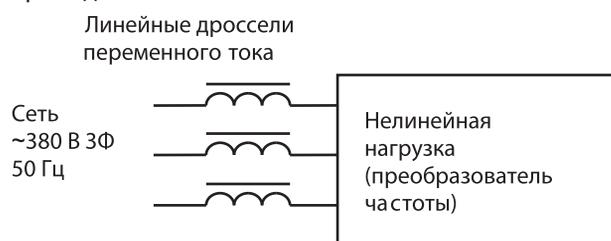


Рис. 5. Включение линейных дросселей

Линейные дроссели переменного тока позволяют уменьшить коэффициент гармоник в несколько раз, в зависимости от соотношения мощности питающего трансформатора, мощности нагрузки и параметров дросселя. Для оценки уровня гармонических искажений можно воспользоваться средствами расчета, имеющимися в открытом доступе, например [7].

Так, при мощности питающего трансформатора 800 кВА подключенные к сети преобразователи частоты разной мощности внесут в нее разные гармонические искажения, например:

- ПЧ мощностью 315 кВт – 7,3 %,
- ПЧ мощностью 30 кВт – 2,9 %.

После установки линейных 2 % дросселей на входах ПЧ уровень гармонических искажений сети снизится и, соответственно, составит:

- для ПЧ мощностью 315 кВт с входным 2 %-м дросселем – 5,6 %,
- для ПЧ мощностью 30 кВт с входным 2 %-м дросселем – 0,8 %.

Включение дросселей постоянного тока в преобразователях частоты

Дроссели постоянного тока в преобразователях частоты подключаются к специально выведенным клеммам в разрыв цепи постоянного тока (рис. 6) – подключение может быть произведено пользователем самостоятельно. Некоторые модели преобразователей поставляются уже со встроенными дросселями постоянного тока.

Эффективность дросселей постоянного тока в части снижения гармонических искажений напряжения сети примерно такая же, как и линейных дросселей переменного тока.

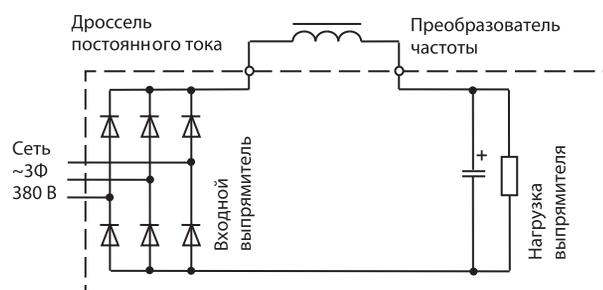


Рис. 6. Включение дросселя постоянного тока

Используя предыдущий пример, можно определить, что установленные 2 %-е дроссели постоянного тока снизят уровень гармонических искажений, соответственно, до уровня:

- для ПЧ мощностью 315 кВт с 2 %-м дросселем постоянного тока – 6,3 %,
- для ПЧ мощностью 30 кВт с 2 %-м дросселем постоянного тока – 1,3 %.

Применение пассивных (резонансных) фильтров

Применение последовательно включенных линейных дросселей (или дросселей постоянного тока в преобразователях частоты) в ряде случаев не позволяет уменьшить гармонические искажения до желаемых пределов. В этом случае целесообразно применение пассивных LC-фильтров, настроенных на определенную частоту гармоник (резонансных фильтров).

Для улучшения гармонического состава потребляемого тока такие фильтры нашли широкое применение, например, в системах с источниками бесперебойного питания (ИБП) [4]. Подключение фильтра на входе 6-пульсного выпрямителя при 100 %-й нагрузке ИБП обеспечивает снижение коэффициента искажения синусоидальности до величины 8–10 %. Значения этого коэффициента в системе без фильтра может достигать 30 % и более. На рис. 7 приведен вариант трехфазного LC-фильтра, применяемого в трехфазных ИБП.

LC-фильтр (рис. 7) содержит продольные индуктивности и поперечные цепи, состоящие из последовательно включенных индуктивности и

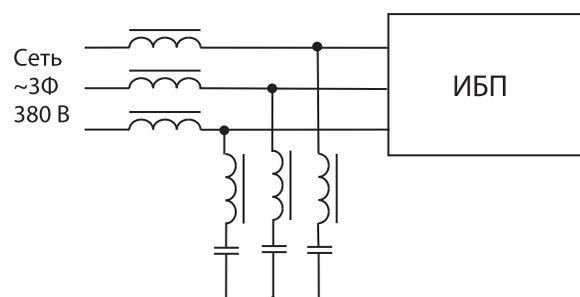


Рис. 7. Трехфазный LC-фильтр

емкости, которые образуют последовательный колебательный контур, настроенный на определенную гармонику.

Например, если фильтр настроен на 5-ю гармонику, то сопротивление поперечной LC-цепи на частоте 5-й гармоники близко к нулю. В результате напряжение 5-й гармоники будет близко к нулю, и 5-я гармоника в спектре гармоник напряжения будет отсутствовать.

5.3. Использование специальных устройств

Применение специальных разделительных трансформаторов

Разделительный трансформатор с обмотками «треугольник-звезда» позволяет эффективно бороться с гармониками, кратными третьей, при сбалансированной нагрузке в трехфазной сети. Для ослабления влияния несимметрии нагрузки и уменьшения тока нейтрали дополнительно применяют «перекрестную» (зигзагообразную) систему обмоток, где вторичная обмотка каждой фазы разбита на две части и размещена на разных стержнях магнитопровода трансформатора.

Специальный K-фактор-трансформатор [4], будучи примененным вместо обычного трансформатора, позволяет выдержать нагревание, вызванное высшими гармониками за счет того, что такие трансформаторы имеют дополнительную теплоемкость. Кроме того, специальная конструкция K-фактор-трансформаторов позволяет свести к минимуму потери на вихревые токи и потери из-за паразитной емкости.

Применение магнитных синтезаторов

Магнитный синтезатор представляет собой устройство, получающее на вход трехфазное напряжение электросети и генерирующее на выходе стабилизированное трехфазное переменное напряжение, защищенное от высших гармоник в сети, вызывающих искажение синусоидальной формы входного напряжения, а также от провалов и выбросов электропитания, импульсных и высокочастотных помех.

Выходное напряжение магнитного синтезатора на каждом полупериоде основной частоты генерируется путем объединения шести прямоугольных импульсов от связанных между собой импульсных трансформаторов с насыщением, аналогично инверторам со ступенчатым (пошаговым) принципом управления. Принцип работы магнитного синтезатора обеспечивает точную регулировку формируемых импульсов по амплитуде и длительности. Магнит-

ный синтезатор не содержит каких-либо силовых полупроводниковых элементов, выполняя функцию стабилизатора напряжения.

Коэффициент искажения синусоидальности выходного напряжения магнитного синтезатора не превышает 4 %, независимо от степени искажения напряжения сети на входе даже при полностью асимметричной нагрузке [4].

Применение активных фильтров гармоник (АФГ)

Другое название этих устройств – активные кондиционеры гармоник.

В отличие от пассивных фильтров гармоник, которые требуют полного анализа электросети и производятся для подавления всего нескольких гармоник, активные фильтры гармоник электросети, напротив, подавляют весь спектр гармонических составляющих в сети и не приводят к резонансу с существующим оборудованием: силовыми трансформаторами и косинусными конденсаторами.

Активный фильтр гармоник подключается параллельно нелинейной нагрузке (рис. 8) [5].

Принцип действия активного фильтра гармоник основан на анализе гармоник нелинейной нагрузки и генерировании в распределительную сеть таких же гармоник, но с противоположной фазой. В результате высшие гармонические составляющие нейтрализуются в точке подключения фильтра, не распространяются от нелинейной нагрузки в сеть и не искажают напряжения сети.

Активный фильтр гармоник может быть установлен в любой точке распределительной сети и способен компенсировать высшие гармоники от одной или нескольких нелинейных нагрузок.

Активный фильтр гармоник обеспечивает наилучшее подавление высших гармоник. Например, применение такого фильтра позволяет снизить коэффициент искажения синусоидальности напряжения с THD = 17 % (без фильтров) до THD = 2,5 % [6].

Применение активных фильтров для подавления высших гармоник однозначно необходимо в случае их большого уровня – THD > 50 % [8].

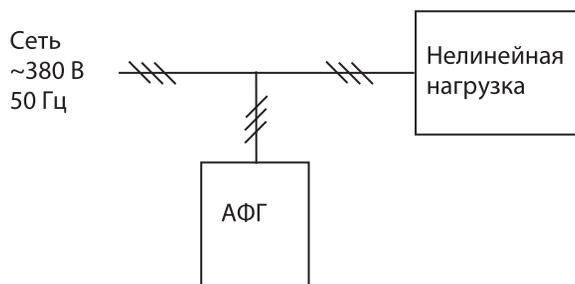


Рис. 8. Подключение активного фильтра гармоник

6. ПРАКТИЧЕСКИЕ ДЕЙСТВИЯ ПО УМЕНЬШЕНИЮ ГАРМОНИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ НА ПРЕДПРИЯТИИ (ОБЪЕКТЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ)

Для уменьшения гармонических искажений напряжения питающей сети на предприятии (или на объекте эксплуатации, например, на насосной станции и т.п.) и приведения их к уровню, соответствующему требованиям ГОСТ 13109-97, рекомендуем следовать следующему алгоритму:

6.1. Выделить полную номенклатуру всех электропотребителей в схеме электроснабжения на предприятии (исследуемом объекте), относящихся к категории нелинейных и определить их суммарную мощность.

Примечание. Как правило, если доля суммарной установленной мощности нелинейных потребителей в электросети не превышает 10–15 % от номинальной мощности трансформатора питания, каких-либо особенностей в эксплуатации системы электроснабжения не возникает [2] и коэффициент искажения синусоидальности K_U не превышает допустимого уровня по ГОСТ 13109-97.

Но по мере развития предприятия производится дополнительная установка все большего количества новых нелинейных потребителей. Каждый из них приносит свой вклад в искажение синусоидальности напряжения, и общий коэффициент гармоник электросети растет.

При превышении доли суммарной мощности нелинейных потребителей 25 % могут наблюдаться влияния гармонических искажений на функционирование других электропотребителей сети и нарушение их нормальной работы [2].

Если обнаружены следующие признаки:

- ♦ значительные гармонические искажения напряжения питающей электросети при малой доле (< 10–15 % от номинальной мощности сети) установленных нелинейных потребителей все же присутствуют,
- ♦ или гармонические искажения внезапно увеличились по неизвестным причинам,
- ♦ или увеличившееся количество установленных нелинейных потребителей вызвало рост гармонических искажений,

то прежде, чем устанавливать дополнительные устройства для снижения коэффициента гармоник (см. выше раздел 5), рекомендуется провести диагностику сети электропитания (см. следующий пункт).

6.2. Провести диагностику сети электропитания с измерением параметров для оценки доли присутствующих в сети высших гармоник.

Примечание. Измерение коэффициента искажения синусоидальности напряжения K_U производится анализатором качества электроэнергии (например, FLuke 434, ЭРИС-КЭ.02 и др.) своими силами или сторонними организациями.

Зачастую цепи электропитания на конкретном объекте являются частью общей электросети, к которой подключены другие потребители (другие объекты), вносящие свой вклад в гармонические искажения.

1) Поэтому диагностику питающей сети на исследуемом объекте рекомендуется начинать с измерения коэффициента искажения синусоидальности ненагруженной электросети K_{U0} – при отключенных потребителях.

Если коэффициент искажения синусоидальности ненагруженной сети K_{U0} имеет повышенное значение (4–8 %), то следует выяснить причины этого. Для этого, прежде всего, рекомендуется провести мероприятия, предусмотренные штатными регламентными работами электрослужбы предприятия, в том числе: проверить состояние питающих проводов, кабелей, клемм, переходных сопротивлений силовых соединений фазных и нейтральных проводов, качество соединений заземления корпусов электроприборов и т.д. Вполне возможно, что причиной высокого коэффициента гармоник может оказаться, например, ослабленное соединение силовых проводов. После проведения регламентных работ необходимо заново проверить коэффициент гармоник K_{U0} ненагруженной сети.

Другой возможной причиной повышенного коэффициента гармоник может оказаться изначальная поставка электроэнергии от энергоснабжающей организации с заведомо ухудшенными параметрами.

2) Затем, последовательно подключая к сети потребителей с нелинейной нагрузкой, – измерить коэффициенты искажения несинусоидальности $K_{UП1}$, $K_{UП2}$ и т.д. при каждом нелинейном электропотребителе П1, П2 и др., и, таким образом, определить вклад конкретного потребителя в общие гармонические искажения.

3) После этого необходимо измерить общий коэффициент искажения синусоидальности K_U при всех включенных нелинейных потребителях.

6.3. В случае если после выполнения диагностики сети и проведения штатных регламентных мероприятий (см. выше п. 7.2) измеренное значение общего коэффициента искажения синусоидальности напряжения K_U **превышает нормально допустимый**

Действия, рекомендуемые для снижения гармонических искажений

Коэффициент гармоник ненагруженной сети K_{U0}	Рекомендуемые действия для снижения коэффициента гармоник в нагруженной сети (при измеренном значении K_U)		
	$K_U = 8,5-10\%$	$K_U = 11-25\%$	$K_U \geq 30-35\%$
2–3%	Установить линейные дроссели и/или дроссели постоянного тока	Установить пассивные (резонансные) фильтры	Установить пассивные (резонансные) или активные фильтры гармоник (АФГ) либо выполнить мероприятия по п. 5.1 (см. выше)
4–5%	Установить пассивные (резонансные) фильтры	Установить пассивные (резонансные) или активные фильтры гармоник (АФГ)	Установить активные фильтры гармоник (АФГ) либо выполнить мероприятия по п. 5.1 (см. выше)
6–8%	<p>Определить причину такого повышенного значения коэффициента искажения синусоидальности ненагруженной сети K_{U0}, близкого к нормально допустимому (8%). Возможно, проблема может заключаться в ослабленных соединениях силовых проводов или плохом качестве электроэнергии, поставляемой от энергоснабжающей организации.</p> <p>В любом случае дальнейшее подключение дополнительных нелинейных потребителей к сети недопустимо, т.к. невозможно выполнить требования ГОСТ 13109-97.</p>		

уровень, установленный в ГОСТ 13109-97 (8%), то к нелинейным потребителям, начиная с наиболее мощного, рекомендуется последовательно подключить устройства, ослабляющие уровень высших гармоник (см. выше раздел 5), – фильтры и т. п. – или выполнить изменения в конфигурации и конструкции составных частей сети (п. 5.1).

Рекомендуемые варианты практических действий по снижению гармонических искажений, в зависимости от коэффициента гармоник ненагруженной электросети K_{U0} и вкладов каждого потребителя в гармонические искажения $K_{U_{П1}}$, $K_{U_{П2}}$ и т. д., изложены в таблице и в примерах ниже.

Примечание. Действия, перечисленные в таблице, рекомендуется проводить только после того, как выполнены все штатные регламентные мероприятия в питающей сети, и если нет возможности для снижения коэффициента гармоник без дополнительных устройств.

7. ПРИМЕРЫ

а) Задача. К питающему трансформатору мощностью 1000 кВА 6/0,4 кВ требуется подключить преобразователь частоты мощностью 315 кВт 0,4 кВ с входным выпрямителем, выполненным по шестиполупериодной схеме, и преобразователь частоты мощностью 37 кВт 0,4 кВ с таким же выпрямителем (оба ПЧ – без дросселей постоянного тока). Ненагруженная сеть имеет коэффициент гармоник 2,5%. Кроме того, от этого же трансформатора необходимо напрямую включить асинхронный электродвигатель мощностью 15 кВт 0,4 кВ.

Необходимо определить, какой коэффициент гармоник будет в сети и нужны ли в данном случае устройства, уменьшающие гармонические искажения.

Трансформатор питания 1000 кВА 6/0,4 кВ.

Коэффициент искажения синусоидальности ненагруженной сети $K_{U0} = 2,5\%$.

Потребители: П1 – преобразователь частоты 315 кВт 0,4 кВ; П2 – преобразователь частоты 37 кВт 0,4 кВ; П3 – электродвигатель 15 кВт 0,4 кВ.

Решение. Оценим, какие коэффициенты гармоник будут вносить в электросеть преобразователи частоты:

- преобразователь частоты 315 кВт – $K_{U_{П1}} = 7,0\%$;
- преобразователь частоты 37 кВт – $K_{U_{П2}} = 3,2\%$ (асинхронный электродвигатель мощностью 15 кВт считаем линейной нагрузкой).

Общий коэффициент гармоник составит:

$$K_U = K_{U0} + K_{U_{П1}} + K_{U_{П2}} + K_{U_{П3}} = 2,5\% + 7,0\% + 3,2\% + 0\% = 12,7\%,$$

что превышает нормально допустимый уровень по ГОСТ 13109-97.

Очевидно, что для снижения коэффициента гармоник необходимо установить какие-либо фильтрующие устройства. Подключим к преобразователям частоты линейные (входные) 2% дроссели. Коэффициенты

гармоник, вносимые в сеть преобразователями частоты, при этом составят:

- преобразователь частоты 315 кВт с линейным 2%-м дросселем – $K_{U_{П1}} = 5,1\%$;
- преобразователь частоты 37 кВт с линейным 2%-м дросселем – $K_{U_{П2}} = 0,9\%$.

Общий коэффициент гармоник будет равен:

$$K_U = K_{U_0} + K_{U_{П1}} + K_{U_{П2}} + K_{U_{П3}} = \\ = 2,5\% + 5,1\% + 0,9\% + 0\% = 8,5\%.$$

Полученное новое значение коэффициента гармоник (8,5%) по-прежнему превышает нормально допустимое значение по ГОСТ 13109-97.

Установим вместо 2%-ных дросселей линейные 4% дроссели перед входными питающими цепями преобразователей частоты 315 кВт и 37 кВт. Теперь вносимые ими коэффициенты гармоник еще более уменьшатся и, соответственно, составят:

$$K_{U_{П1}} = 4,3\%; \\ K_{U_{П2}} = 0,6\%.$$

Общий коэффициент гармоник также уменьшится:

$$K_U = 2,5\% + 4,3\% + 0,6\% + 0\% = 7,4\%,$$

что соответствует требованиям ГОСТ 13109-97.

б) Задача. В прокатном цехе установлены и работают несколько технологических линий, оснащенных преобразователями частоты – всего 15 преобразователей частоты по 30 кВт (в преобразователи уже встроены 2%-е реакторы постоянного тока). Мощность питающего трансформатора – 1600 кВА. Коэффициент гармоник ненагруженной сети $K_{U_0} = 0,3\%$. Планируется расширить производство и в этом же цехе дополнительно установить 20 преобразователей частоты по 3,7 кВт.

Определить коэффициент гармоник при работающих установленных преобразователях частоты. Насколько увеличится общий коэффициент гармоник при вводе в работу дополнительных преобразователей частоты? Нужны ли будут дополнительные фильтрующие устройства?

Трансформатор питания 1600 кВА 6/0,4 кВ.

Потребители: П1 – преобразователи частоты 15 x 30 кВт = 450 кВт; П2 – преобразователи частоты 20 x 3,7 кВт = 74 кВт.

Решение. Определим, что общий коэффициент гармоник при работающих 15 преобразователях частоты по 30 кВт составит:

$$K_U = K_{U_0} + K_{U_{П1}} = 0,3\% + 6,0\% = 6,3\%.$$

Дополнительные преобразователи частоты (3,7 кВт 20 шт.) внесут в сеть коэффициент гармоник $K_{U_{П2}} = 4,1\%$.

Общий коэффициент гармоник при всех установленных преобразователях частоты составит:

$$K_U = K_{U_0} + K_{U_{П1}} + K_{U_{П2}} = 0,3\% + 6,3\% + 4,1\% = 10,7\%,$$

что превышает допустимое значение по ГОСТ 13109-97.

Для снижения общего коэффициента гармоник необходимо установить дополнительные фильтры. Установим перед 30 кВт-ными и перед 3,7 кВт-ными преобразователями частоты 2% линейные дроссели.

Новое значение коэффициента гармоник:

$$K_U = K_{U_0} + K_{U_{П1}} + K_{U_{П2}} = 0,3\% + 5,0\% + 1,3\% = 6,6\%,$$

что соответствует требованиям ГОСТ 13109-97.

в) Задача. К питающему трансформатору мощностью 160 кВА 6/0,4 кВ, от которого запитан поселок (20 частных домов), необходимо дополнительно подключить скважинный водяной насос, управляемый частотным преобразователем мощностью 5,5 кВт 0,4 кВ. Ненагруженная сеть имеет коэффициент гармоник 0,5%.

Определить, какие гармонические искажения внесет преобразователь частоты в питающую сеть и необходимо ли устанавливать дополнительные фильтрующие устройства.

Трансформатор питания 160 кВА 6/0,4 кВ.

Коэффициент искажения синусоидальности ненагруженной сети $K_{U_0} = 0,5\%$.

Потребители: П1 – преобразователь частоты 5 кВт 0,4 кВ; П2 – жилые дома 20 x 5 кВт = 100 кВт 0,4 кВ.

Решение. Считаем, что среднее потребление каждого дома составляет 5 кВт.

Определим общий коэффициент гармоник:

$$K_U = K_{U_0} + K_{U_{П1}} + K_{U_{П2}} = 0,5\% + 1,9\% + 0\% = 2,4\%,$$

что соответствует требованиям ГОСТ 13109-97. Дополнительные фильтрующие устройства не требуются.

Усложнение задачи в). После установки и подключения частотного преобразователя мощностью 5,5 кВт 0,4 кВ к электродвигателю скважинного насоса в той же электросети, с питающим трансформатором 160 кВА 6/0,4 кВ, наблюдается влияние высших гармоник на других потребителей: искажаются показания электросчетчиков в частных домах электропотребителей, подключенных в разных

местах к питающей линии электропередачи 0,4 кВ на протяжении всего поселка.

Измеренное значение коэффициента гармоник на входных питающих зажимах преобразователя частоты составило 13,5 %.

Что необходимо предпринять для снижения коэффициента гармоник в электросети до уровня, допустимого ГОСТ 13109-97, и таким образом устранить влияние работы преобразователя частоты на других потребителей электросети в поселке?

Решение. В приведенной выше оценке ожидаемых гармонических искажений ($K_U = 2,4\%$) не учтено электрическое сопротивление линии электропередачи 0,4 кВ, имеющей значительную протяженность вдоль всего поселка. Электропотребители в частных домах, подключенные вдоль всей линии электропередачи, подвергаются влиянию наведенного напряжения высших гармоник на значительном сопротивлении линии [3] (см. выше раздел 4) от преобразователя частоты, включенного в эту же линию электропередачи.

Приведенные выше расчеты в примерах а) и б) показывают, что простейшие решения по снижению коэффициента гармоник – установка линейных дросселей и дросселей постоянного тока – позволят снизить значение коэффициента гармоник с 13,5 % примерно до 10–11,5 %, но не решат поставленную задачу – довести уровень гармонических искажений до требований ГОСТ 13109-97 (не более 8 %).

Поэтому, в данном примере для снижения гармонических искажений, возможно, потребуется более сложное решение, например:

- прокладка отдельной линии электропередачи с увеличенным сечением проводов от питающего трансформатора до скважины, где установлен преобразователь частоты;
- или установка пассивного резонансного фильтра (см. п. 5.2);
- или установка активного фильтра гармоник (АФГ) (см. п. 5.2);
- или одновременно с применением фильтрующих устройств (п. 5.2) установка в домах электропотребителей других моделей электросчетчиков, нечувствительных к воздействию высших гармоник.

Для выбора экономически обоснованного решения необходимо инструментальное обследование электросети поселка в части гармонических искажений, включая трансформатор питания, линию электропередачи, потребителей.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Задача уменьшения влияния гармонических искажений электросети, возникающих при работе

нелинейных потребителей, в частности преобразователей частоты, может быть решена.

Сложность и содержание выбранного решения зависят от степени вносимых преобразователями частоты гармонических искажений и их отклонений от требований ГОСТ 13109-97.

При небольшом увеличении общего коэффициента гармоник сети сверх допустимого значения ($K_U = 8,0\text{--}10,0\%$) достаточно установить перед преобразователями частоты линейные дроссели или дроссели постоянного тока (или одновременно те и другие). При этом для предварительной оценки эффективности установки фильтрующих устройств рекомендуется воспользоваться методиками расчета.

В случаях большего превышения гармонических искажений (K_U более 10,0%) нужен более тщательный анализ гармонических искажений сети и распределения энергии высших гармоник с использованием измерителя нелинейных искажений или анализатора качества электроэнергии. Соответствующие технические решения могут быть направлены на подавление какой-то одной доминирующей высшей гармоники (например, пассивные резонансные фильтры) или же на подавление высших гармоник во всем спектре (например, активные фильтры гармоник).

В любом случае для снижения гармонических искажений рекомендуется предварительное обследование питающей электросети для определения:

- параметров источника электропитания (мощности, конфигурации питающего трансформатора и т. д.);
- характеристик подключенных нелинейных потребителей (их количества и распределения по фазам, мощности, мест подключения и т. д.);
- линий электропередачи (протяженности, сечения проводов, распределительных устройств и т. д.);
- локализации и классификации влияния гармонических искажений (кратковременные сбои или необратимые нарушения в работе приборов, воздействие на всех линейных потребителей сети или влияние только на локальном участке и т. д.);
- коэффициента нелинейных искажений ненагруженной электросети (для оценки качества электроэнергии, получаемой от энергоснабжающей организации).

Регулярно проводя штатные профилактические мероприятия в электросети предприятия и последовательно выполняя действия по установке дополнительных фильтрующих устройств, начиная с самых простых, можно добиться снижения уровня гармонических искажений в электросети при работе преобразователей частоты до уровня, допустимого по ГОСТ 13109-97.

9. ТЕРМИНЫ

Гармоника – гармоническое (совершаемое по синусоидальному закону с определенной частотой) колебание какой-либо физической величины, например напряжения или тока. В большинстве случаев под названием «гармоники» подразумевают гармонические колебания в системе, частоты которых выше основной частоты (1-ой гармоники) и кратны ей.

Спектр гармоник – график, показывающий распределение энергии по частоте какого-либо периодического временного сигнала. Спектр периодического сигнала представляет набор дискретных гармонических сигналов (гармоник) с частотами, кратными основной частоте. Другое его название – линейчатый спектр.

Фильтр гармоник – устройство, имеющее неравномерный (избирательный) коэффициент передачи по частоте: пропускает со входа на выход определенные частоты (или полосу частот) и не пропускает или ослабляет другие частоты.

Симметричный режим трехфазной сети – режим, при котором соблюдаются условия симметрии фазных ЭДС источника $\dot{E}_A = E$, $\dot{E}_B = Ee^{-j120^\circ}$, $\dot{E}_C = Ee^{j120^\circ}$ и равенства сопротивлений фаз приемника $Z_A = Z_B = Z_C$.

Несимметричный режим трехфазной сети – режим, при котором нарушается хотя бы одно из условий симметрии фазных ЭДС источника $\dot{E}_A = E$, $\dot{E}_B = Ee^{-j120^\circ}$, $\dot{E}_C = Ee^{j120^\circ}$ и равенства сопротивлений фаз приемника $Z_A = Z_B = Z_C$.

Нормально допустимое значение – значение, которого не превышают измеренные с вероятностью 95 % значения коэффициента искажения синусоидальности и коэффициента n-ой гармонической составляющей в течение минимального интервала времени измерений по ГОСТ 13109-97.

Предельно допустимое значение – значение, которого не превышают наибольшие из измеренных значений коэффициента искажения синусоидальности и коэффициента n-ой гармонической составляющей в течение минимального интервала времени измерений по ГОСТ 13109-97.

Относительное индуктивное сопротивление дросселя $X_{др}$, % – выраженное в процентах отношение индуктивного сопротивления дросселя к входному сопротивлению нагрузки, перед которой включен дроссель.

К-фактор – коэффициент, характеризующий вклад высших гармоник в процесс нагрева трансформатора. Если К-фактор равен единице, то это означает, что нагрузка линейная и в цепи протекает синусоидальный ток. Значения К-фактора выше единицы указывают на дополнительные тепловые потери при нелинейных нагрузках, которые трансформатор способен без-опасно рассеять.

10. ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 13109-97 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

2. Григорьев О., Петухов В., Соколов В., Красилов И. Высшие гармоники в сетях электроснабжения 0,4 кВ // Новости электротехники. – 2002. – № 6.

3. Климов В.П., Москалев А.Д. Проблемы высших гармоник в современных системах электропитания // Практическая силовая электроника. – 2003. – № 6.

4. Климов В.П., Москалев А.Д. Способы подавления гармоник тока в системах электропитания. – Режим доступа: www.tensy.ru.

5. Климов В., Карпиленко Ю., Смирнов В. Компенсаторы реактивной мощности и мощности искажения в системах гарантированного электропитания промышленного назначения // Силовая электроника. – 2008. – № 3.

6. Активный фильтр гармоник электросети. Компания «Матик-электро», г. Москва. www.matic.ru.

7. Harmonic Calculator. <http://www.ab.com/support/abdrives/documentation/techpapers/page8.htm>.

8. Шишкин С. Защитные антирезонансные дроссели низковольтных конденсаторных батарей // Силовая электроника. – 2007. – № 4.

9. Hazem Z. Lowpass Broadband Harmonic Filter Design. M.S., Department of Electrical and Electronics Engineering, 2005.

10. Кузьмина О. О совместной работе ИБП и ДГУ. – Режим доступа: <http://www.power-machines.ru/>.

Барутсков И. Б.
Вдовенко С. А.
Цыганков Е. В.

Тел./факс (495) 258-00-49,
<http://www.vesper.ru>,
<http://www.vesper.pf>
mail@vesper.ru.

Компания
ВЕСПЕР