

Высшие гармоники в сетях электроснабжения 0,4 кВ

Авторы: Олег Григорьев, Виктор Петухов, Василий Соколов, Игорь Красилов.

[Центр электромагнитной
безопасности](#)



Согласно материалам
журнала [Новости
Электротехники 6\(18\) 2002
- 1\(19\) 2003](#)

За последние 3 года Центр электромагнитной безопасности исследовал в Москве состояние систем электроснабжения в крупнейших зданиях, имеющих компьютерные сети, в которые включены от двадцати до тысячи и более компьютеров. Анализ собственных данных, подкрепленный анализом зарубежных публикаций, общение с коллегами из IEEE (The Institute of Electrical and Electronics Engineers), привели нас к выводу, что Россия столкнулась с новой серьезнейшей проблемой. Ее суть в том, что сети электроснабжения 0,4 кВ в зданиях, оснащенных компьютерной техникой, «заражены» высшими по отношению к промышленной частоте (50 Гц) гармониками.

Проблема не уникальна. Все страны на определенном этапе концентрации компьютерной техники сталкиваются с ней и вынуждены кардинально менять технические регламенты эксплуатации, нормы проектирования, разрабатывать соответствующую базу стандартов.

В случаях, когда мощность нелинейных электропотребителей не превышает 10-15 %, каких-либо особенностей в эксплуатации системы электроснабжения, как правило, не возникает. При превышении указанного предела следует ожидать появления различных проблем в эксплуатации и последствий, причины которых не являются очевидными. В зданиях, имеющих долю нелинейной нагрузки свыше 25%, отдельные проблемы могут проявиться сразу.

Негативное воздействие высших гармоник

Высшие гармонические составляющие в токах нелинейных электропотребителей приводят к негативным, а иногда и катастрофическим последствиям.

1. Возможен перегрев и разрушение нулевых рабочих проводников кабельных линий вследствие их перегрузки токами третьей гармоники. Это происходит тогда, когда токи в нулевых рабочих проводниках значительно превосходят

токи фазных проводников, а защита от токовых перегрузок в цепях нулевых проводников не предусмотрена (п.1.3.10 ПУЭ). Отметим также ускоренное старение изоляции при повышении рабочей t_0 токонесущих проводников. Нулевой рабочий проводник не защищен от перегрева автоматическими выключателями либо предохранителями (п.3.1.17 ПУЭ). «Старые» системы электроснабжения проектировались только под линейную нагрузку, т.е. потребляемый электроприемниками ток содержал лишь основную гармонику (50 Гц). Следовательно, ток в нулевом рабочем проводнике не мог превосходить ток в наиболее нагруженной фазе, т.е. защита на фазных проводниках одновременно защищала от перегрева и нулевой рабочий проводник. Кроме того, в процессе эксплуатации неравномерность распределения токов по фазам должна быть не более 10% (п.6.6 табл.6 Приложение 1, ПЭЭП). Поэтому при определении длительно допустимых токов по условиям нагрева проводов и кабелей нулевой рабочий проводник четырехпроводной системы трехфазного тока, заземляющие и нулевые защитные проводники в расчет не принимаются (п.3.1.10 ПУЭ), поскольку ток в этих проводниках при наличии линейных электропотребителей существенно меньше токов в фазных проводниках. В случае нелинейных электропотребителей токи в нулевых рабочих проводниках превышают фазные (предельно — в 1,73 раза, когда ширина импульса тока равна 60 электрическим градусам). Поэтому значения длительно допустимых токов, приведенных в таблицах 1.3.4—1.3.7, в случае нелинейных электропотребителей должны быть снижены. На корпусах электрооборудования, подключенного к нулевому проводу, могут возникать напряжения, оказывающие при прикосновении раздражающее влияние на человека. Однако в случаях использования протяженных линий малого сечения может возникать опасное (более 50 В) напряжение прикосновения на корпусах электроприемников в системе TN—C, когда функции нулевого защитного и нулевого рабочего проводников объединены в одном проводнике. При системе TN—S подобный эффект теоретически может возникнуть при протекании по нулевому защитному проводнику тока значительной величины (при коротком замыкании) (см. дополнение *).

2. Искажение синусоидальности питающего напряжения. Следствием характера тока, потребляемого импульсной нагрузкой, является деформация синусоиды напряжения, действующей на зажимах нагрузки (рис. 1). Синусоида напряжения становится «плоской», так как в момент импульса тока увеличивается падение напряжения на внутреннем сопротивлении сети:

$$U_{\text{нагрузки}}(t) = U_{\text{сети}}(t) - i(t) \cdot Z_{\text{сети}}$$

где $U_{\text{нагрузки}}(t)$ — деформированная синусоида напряжения на зажимах нагрузки; $U_{\text{сети}}(t)$ — синусоидальное напряжение питающей сети; $i(t)$ — импульсный ток нагрузки;

$Z_{\text{сети}}$ — полное сопротивление сети со стороны зажимов нагрузки.

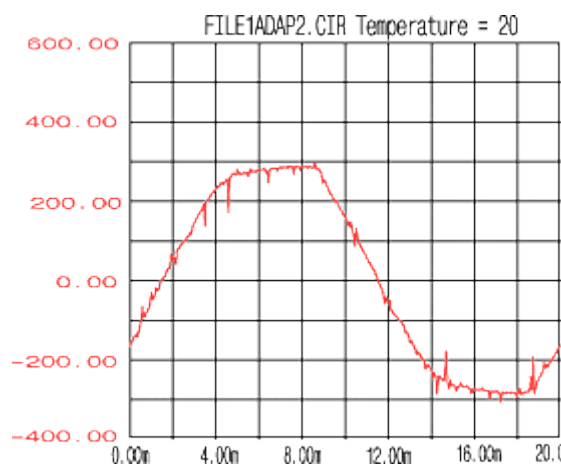


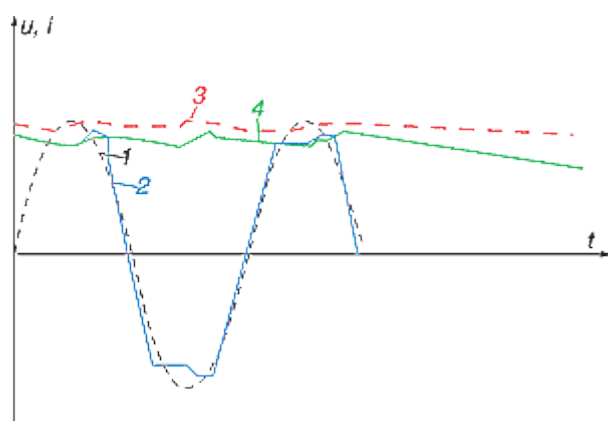
Рис.1.
Питающее напряжение

Если предположить, что сопротивление сети относительно зажимов каждого отдельного электропотребителя равно нулю, то искажения синусоидальности напряжения не существовало бы. В реальности сеть для любого электропотребителя представляет собой

некое сопротивление. Несинусоидальные токи, протекая по этому сопротивлению, вызывают падение напряжения на нем. В результате на зажимах нелинейного электропотребителя, а также на зажимах всех остальных электропотребителей, включенных параллельно ему, появляется несинусоидальное напряжение, обычно — «плоская» синусоида. «Плоская» синусоида, воздействуя на импульсный источник питания, снижает уровень

выпрямленного напряжения; увеличивает тепловыделение в элементах импульсного источника питания; снижает устойчивость к кратковременным провалам напряжения.

Снижение уровня выпрямленного напряжения. Деформация синусоиды питающего напряжения приводит к снижению значения амплитуды входного напряжения, вследствие этого снижается напряжение на конденсаторе



(рис. 2).

Рис. 2.
Снижение напряжения на сглаживающем конденсаторе импульсного источника питания вследствие воздействия «плоской» синусоиды напряжения

- 1 - синусоидальное напряжение;**
- 2 – «плоская» синусоида напряжения;**
- 3 - напряжение на конденсаторе при синусоидальном напряжении;**
- 4 - напряжение на конденсаторе при «плоской» синусоиде напряжения**

Снижение уровня напряжения на конденсаторе, с которого осуществляется питание высокочастотного преобразователя, а далее и цепей постоянного тока, должно было бы привести к снижению уровня выпрямленного напряжения. Но

в большинстве импульсных источников питания предусмотрена система стабилизации выходного напряжения, например методом широтно-импульсного регулирования. Снижение уровня входного напряжения в допустимых пределах не вызовет снижения уровня выходного постоянного напряжения.

Увеличение тепловыделения в элементах импульсного источника питания. При методе широтно-импульсного регулирования снижение входного напряжения вызовет увеличение длительности импульсов тока высокочастотного преобразователя по отношению к длительности пауз. Это означает увеличение тока, потребляемого высокочастотным преобразователем, в среднем за период и увеличение скорости разряда конденсатора. Большой ток, потребляемый высокочастотным преобразователем, увеличивает тепловые потери в элементах импульсного источника питания. Так, снижение входного напряжения на 10% вызовет увеличение тока на 11%, а тепловых потерь — на 23%.

Снижение устойчивости к кратковременным провалам напряжения. В случае провала или даже полного исчезновения напряжения на зажимах импульсного источника питания, цепи постоянного тока могут продолжать свою нормальную работу в течение некоторого, очень короткого промежутка времени. Энергия, необходимая для работы в течение этого промежутка времени, — это энергия сглаживающего конденсатора. Несмотря на то, что этот конденсатор обладает весьма большой емкостью, запасаемая им энергия зависит еще и от напряжения, до которого он был первоначально заряжен:

$$W=CU^2/2$$

При синусоидальной форме кривой питающего напряжения конденсатор может зарядиться до напряжения большего, чем он может зарядиться при «плоской» форме питающего напряжения. В таком случае запасенной в конденсаторе энергии может не хватить для поддержания нормальной работы цепей постоянного тока до момента восстановления питающего напряжения при его кратковременном провале или исчезновении.

3. Гармоники, генерируемые нелинейной нагрузкой, создают дополнительные потери в трансформаторах. Эти потери могут привести к значительным потерям энергии и быть причиной выхода из строя трансформаторов вследствие перегрева. Протекание по обмоткам трансформатора несинусоидальных токов, вследствие поверхностного

**Дополнение.*

Токи в нулевых рабочих проводниках могут быть большими, чем токи в фазных проводниках. Это объясняется тем, что при симметричной нагрузке фазные токи основной частоты и все высшие гармоники, за исключением высших гармоник порядка, кратного трем, образуют системы прямой и обратной последовательностей и дают в сумме нуль. Гармоники же порядка, кратного трем, образуют систему нулевой последовательности, т.е. имеют в любой момент времени одинаковые значения и фазы. Поэтому ток в нейтральном проводе равен утроенной сумме токов высших гармоник, кратных трем. Таким образом, при несинусоидальной симметричной нагрузке ток в нулевом рабочем проводнике будет равен:

эффекта и эффекта близости, приводит к увеличению активного сопротивления обмоток трансформатора и, как следствие, к дополнительному нагреву. Срок службы трансформатора зависит от нагрева его частей и не позволяет при несинусоидальном токе использовать трансформатор на всю его номинальную мощность, ее приходится занижать. Например, полная нагрузка трансформатора может наступить при использовании лишь 80% номинальной мощности, указанной в его паспортных данных. Если не учитывать превышение температуры и попытаться использовать трансформатор «в соответствии» с его номинальными данными, срок его службы вполне может сократиться с 40 лет до 40 дней. Кроме того, высокочастотные гармоники тока — это причина появления вихревых токов в обмотках трансформатора, что вызывает дополнительные потери мощности и перегрев трансформатора. Для линейных нагрузок потери на вихревые токи составляют в общих потерях приблизительно 5%, с нелинейной нагрузкой они иногда возрастают в 15—20 раз.

4. В условиях несинусоидальности тока ухудшаются условия

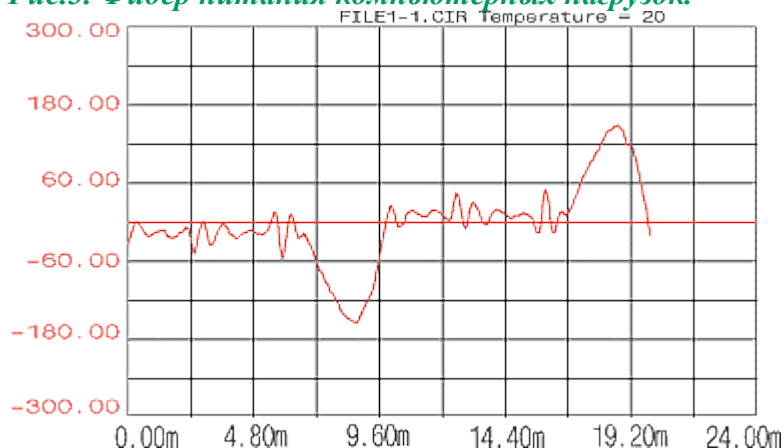
$$I_{\Sigma} = 3 \cdot \sqrt{I_3^2 + I_9^2 + I_{15}^2 + \dots}$$

, где I_3, I_9, I_{15} — действующие значения соответствующих гармоник тока.

При линейной, даже самой мощной нагрузке ток в нулевом рабочем проводнике будет меньше, чем максимальный ток в фазных проводниках. Совсем иная ситуация при наличии нелинейных нагрузок, в этом случае ток в нулевом рабочем проводнике может превышать ток в фазе более чем в 1,5 раза.

Более чем красноречиво говорят об этом осциллограммы токов на фидерах питания компьютерных электропотребителей, представленные на рис.3—6. Все осциллограммы приводятся из базы данных Центра электромагнитной безопасности и получены на объектах г. Москвы.

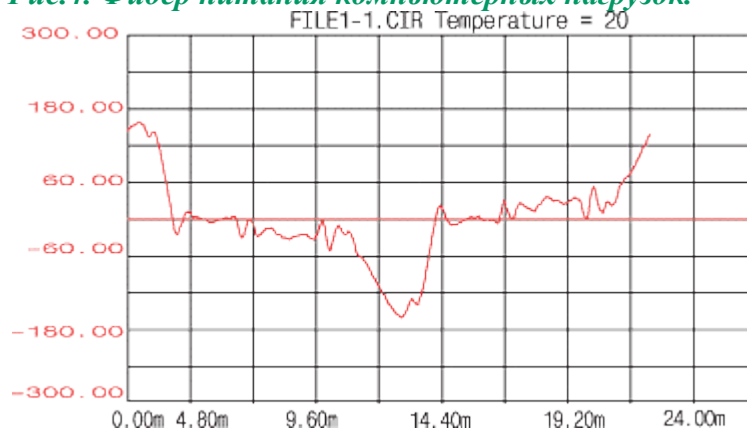
Рис.3. Фидер питания компьютерных нагрузок.



Ток фазы А.

Действующее значение тока – 59,7 А.

Рис.4. Фидер питания компьютерных нагрузок.



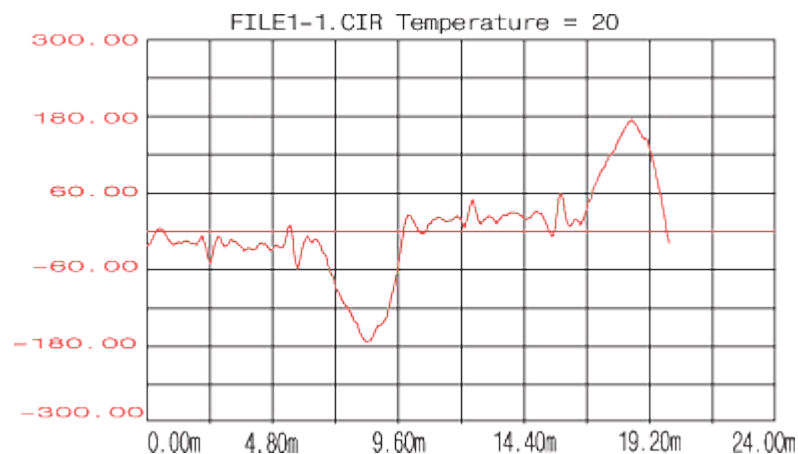
Ток фазы В.

Действующее значение тока — 65 А.

Рис.5. Фидер питания компьютерных нагрузок.

работы батарей конденсаторов. Батареи конденсаторов предназначены для компенсации реактивной мощности нагрузки, то есть для повышения коэффициента мощности электроустановки здания. Однако в условиях несинусоидальности тока батареи конденсаторов одновременно являются элементами, поглощающими гармоники со всей сети, так как сопротивление конденсатора обратно пропорционально частоте f : $X_C = 1/(2\pi fC)$, где f_0 — основная частота, Гц; k — порядок гармоники; C — емкость конденсаторов. Батареи конденсаторов изменяют нормальный путь гармоник тока от нелинейного потребителя к источнику питания, замыкая часть этого тока через себя. Так как сопротивления элементов сети имеют индуктивный характер, то при применении установок компенсации реактивной мощности и наличии нелинейных электропотребителей появляется вероятность проявления резонансных явлений (как по току, так и по напряжению) на отдельных элементах системы электроснабжения.

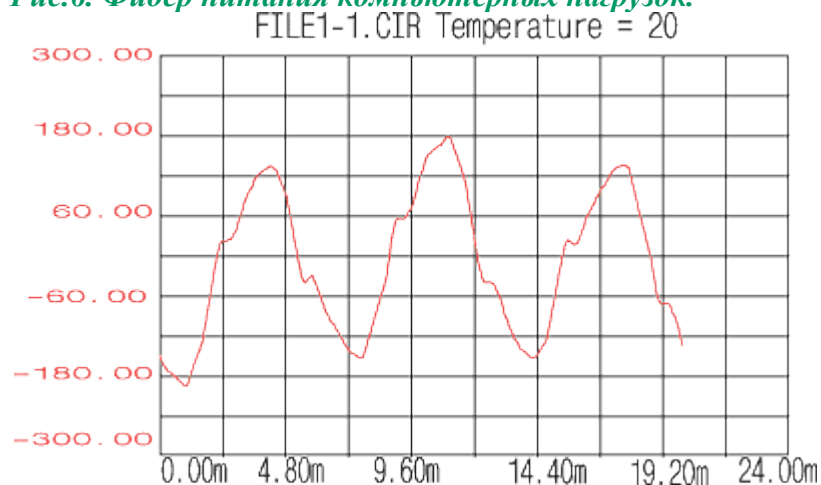
5. Сокращение срока службы электрооборудования из-за интенсификации теплового и электрического старения изоляции. При рабочих t_0 в изоляционных материалах протекают химические реакции, приводящие к



Ток фазы С.

Действующее значение тока — 69,5 А.

Рис.6. Фидер питания компьютерных нагрузок.



Ток в N-проводнике.

Действующее значение тока — 105,7 А.

Из вышеприведенных осциллограмм видно, что действующее значение тока в нулевом рабочем проводнике $I_n=105,7$ А, а наибольшее действующее значение тока в фазе $I_c=69,5$ А.

постепенному изменению их изоляционных и механических свойств. С ростом t^0 эти процессы ускоряются, сокращая срок службы оборудования. В конденсаторах потери энергии пропорциональны частоте $DP = U^2 \omega C \tan \delta$, поэтому несинусоидальный ток приводит к их дополнительному нагреву. В электрических машинах токи нулевой последовательности создают дополнительное подмагничивание стали, что приводит к ухудшению их характеристик и дополнительному нагреву сердечников (статоры асинхронных двигателей, магнитопроводы трансформаторов).

ми гармоники со всей сети, так как сопротивление конденсатора обратно пропорционально частоте f :

$$x_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f \cdot C} = \frac{1}{2\pi k f_0 \cdot C}$$

где f_0 — основная частота, Гц; k — порядок гармоники; C — емкость конденсаторов.

Батареи конденсаторов изменяют нормальный путь гармоник тока от нелинейного потребителя к источнику питания, замыкая часть этого тока через себя. Так как сопротивления элементов сети имеют индуктивный характер, то при применении установок компенсации реактивной мощности и наличии нелинейных электропотребителей появляется вероятность проявления резонансных явлений (как по току, так и по напряжению) на отдельных элементах системы электроснабжения.

5. Сокращение срока службы электрооборудования из-за интенсификации теплового и электрического старения изоляции. При рабочих t^0 в изоляционных материалах протекают химические реакции, приводящие к постепенному изменению их изоляционных и механических свойств. С ростом t^0 эти процессы ускоряются, сокращая срок службы оборудования. В конденсаторах потери энергии пропорциональны частоте $DP = U^2 \omega C \tan \delta$, поэтому несинусоидальный ток приводит к их дополнительному нагреву. В

электрических машинах токи нулевой последовательности создают дополнительное подмагничивание стали, что приводит к ухудшению их характеристик и дополнительному нагреву сердечников (статоры асинхронных двигателей, магнитопроводы трансформаторов). Сущность электрического старения – в возникновении так называемых частичных разрядов, которые распространяются лишь на часть изоляционного промежутка, например, частичные разряды в газовых включениях. Частичные разряды связаны с рассеянием энергии, следствием которого является электрическое, механическое и химическое воздействия на окружающий диэлектрик. В результате развиваются местные дефекты в изоляции, что приводит к сокращению срока службы.

6. Необоснованное срабатывание предохранителей и автоматических выключателей вследствие дополнительного нагрева внутренних элементов защитных устройств. Этот процесс обусловлен протеканием несинусоидальных токов и, следовательно, действием поверхностного эффекта и эффекта близости. В нашей практике встречались случаи необоснованных срабатываний выбранных в соответствии с требованиями ПУЭ автоматических выключателей, защищающих линии питания компьютерного оборудования (при нагрузке, составляющей 80-85% уставки теплового расцепителя автоматического выключателя).

7. Ускоренное старение изоляции проводов и кабелей. Старение изоляции проводников и кабелей обусловлено протеканием несинусоидального тока, приводящего к повышенному нагреву наружной поверхности жил кабеля вследствие поверхностного эффекта и эффекта близости.

8. Помехи в сетях телекоммуникаций могут возникать там, где силовые кабели и кабели телекоммуникаций расположены относительно близко. Вследствие протекания в силовых кабелях высокочастотных гармоник тока, в кабелях телекоммуникаций могут наводиться помехи. Магнитные поля высших гармоник прямой и обратной последовательности частично компенсируют друг друга, поэтому наибольшее влияние на телекоммуникации оказывают гармоники, кратные трем. Чем выше порядок гармоник, тем больше уровень помех, наведенных ими в телекоммуникационных кабелях.

Измерение несинусоидальных токов

Обычно для измерения токов используют токоизмерительные клещи. Если обхватить нулевой рабочий проводник «обычными» токоизмерительными клещами, они могут показать неверный результат, так как работают в частотном диапазоне 50 Гц и зарегистрировать высшие гармоники тока не могут. Следовательно, они показывают только действующее значение основной гармоники тока. Фактическое действующее значение тока при этом может оказаться на 25- 50% больше и превысит длительно допустимый ток, выбранный по условиям термической стойкости проводов и кабельных линий.

Поэтому необходимо применять измерительные инструменты и приборы с широким частотным диапазоном, регистрирующие истинное действующее значение измеряемого тока (приборы с функцией True RMS).

Меры безопасности

Учитывая, что большинство офисов располагается в зданиях, не рассчитанных на значительный рост нелинейных нагрузок, необходим особый подход к эксплуатации систем электроснабжения этих построек. Действия по предупреждению негативного воздействия высших гармоник:

1. Выделить полную номенклатуру всех электропотребителей общего назначения, относящихся к категории нелинейных и вызывающих генерацию повышенной доли высших гармоник в сетях электроснабжения.
2. Провести диагностику состояния сети электропитания для предупреждения пожароопасных и аварийных ситуаций на объектах с долей установленной мощности нелинейных электропотребителей 10% и выше. Дать прогноз работы сети электропитания с точки зрения оценки доли высших гармоник, качества электроэнергии, токовых нагрузок фазных и нулевых рабочих проводников с учетом несинусоидальности токов и напряжений.
3. Учитывать влияние нелинейности нагрузок электропотребителей и наличия высших гармонических составляющих при выполнении проектов реконструкции существующих систем электроснабжения и разработке новых проектов. В том числе при выполнении расчета условий тепловыделения, уровней падения напряжения в кабельных линиях и оценке влияния нелинейных нагрузок на качество питающего напряжения у конечных электропотребителей.
4. Прогнозировать возможные последствия роста компьютерных нагрузок при расширении компьютерных сетей.
5. Проводить работы по диагностике и анализу систем электроснабжения, используя в дополнение к действующим российским нормативным документам стандарт C11A IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial Power Systems Analysis (IEEE Brown book) (ANSI) IEEE Std 399—1997.

Литература:

1. Harmonic Trend in the USA: A Preliminary Survey. I.M. Nejdawi, A.E. Emanuel, D.J. Pileggi, M.J. Corridori, R.D. Archambeault/IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 14, | 4, 1999, pp. 1488—1494.
2. IEEE STD 1100—1999. IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment (IEEE Emerald book) (ANSI).
3. Harmonic Mitigating Transformer Energy Saving Analysis. MIRUS International Inc. Oct., 1999.
4. Evaluating Harmonic Concerns With Distributed Loads. Mark McGranaghan. Electrotek Concepts. Knoxville, Tenn., Nov. 2001.

5. Treating Harmonics in Electrical Distribution System. Victor A. Ramos JR.
Computer Power & Consulting. January, 1999.