

## Компьютер в нагрузку.

<http://offline.computerra.ru/2002/472/22266/>

**Олег Григорьев** - директор Центра электромагнитной безопасности (ЦЭМБ, [www.tesla.ru](http://www.tesla.ru)).

**Виктор Петухов** - руководитель Электротехнического отделения ЦЭМБ, кандидат технических наук, член IEEE.

**Василий Соколов** - зам. руководителя Электротехнического отделения ЦЭМБ.

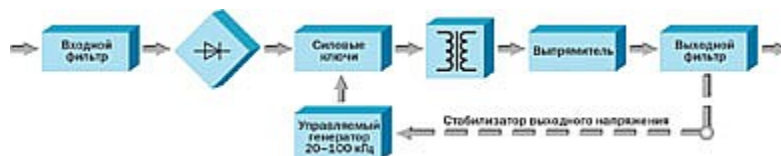
**Игорь Красилов** - ведущий инженер Электротехнического отделения ЦЭМБ.



Материальной основой современного информационного общества, безусловно, является компьютер. За минувшее десятилетие он не только изменил образ жизни и работы миллиардов людей, но и сформировал новые требования к технической инфраструктуре, обеспечивающей его собственное функционирование. Центр электромагнитной безопасности в последние три года исследовал состояние систем электроснабжения напряжением 0,4 кВ в крупнейших зданиях Москвы, содержащих компьютерные сети численностью от двадцати до более чем тысячи компьютеров. Анализ результатов измерений, подкрепленный анализом зарубежных научно-технических публикаций [1-3], а также общение с коллегами из IEEE (The Institute of Electrical and Electronics Engineers) привело нас к выводу, что Россия столкнулась с новой серьезнейшей проблемой. Суть ее состоит в том, что сети электроснабжения 0,4 кВ в зданиях, оснащенных компьютерной техникой, «заражены» высшими по отношению к промышленной частоте (50 Гц) гармониками.

Сразу заметим, что проблема не является чисто российской - все страны на определенном этапе концентрации компьютерной техники столкнулись с ней и были вынуждены принимать решительные меры, включая кардинальное изменение технических регламентов эксплуатации, норм проектирования и разработки соответствующих стандартов. С учетом того, что наша страна, в том числе благодаря реализации Федеральной программы «Электронная Россия», рассчитывает на многократное увеличение компьютерного парка, мы считаем, что актуальность проблемы будет возрастать.

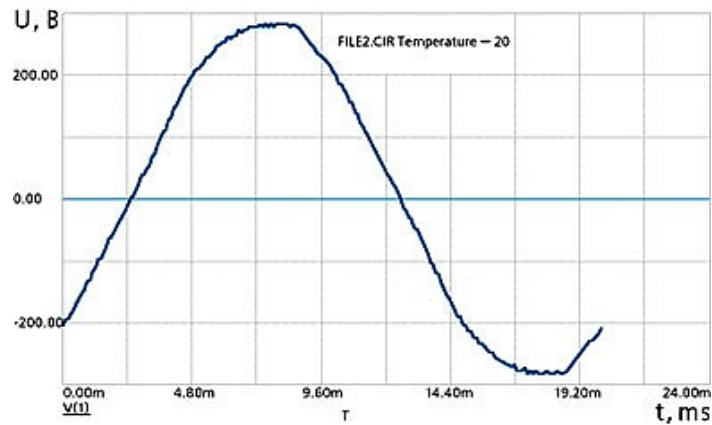
Техническая подоплека вопроса в следующем. В недавнем прошлом большая часть электрической энергии потреблялась линейными нагрузками - лампами накаливания, нагревательными элементами (ТЭН), двигателями и другими подобными потребителями электроэнергии. С конца 1990-х годов резко возросла доля нелинейных электропотребителей. В первую очередь это персональные компьютеры и файл-серверы, мониторы, лазерные принтеры, блоки бесперебойного питания (UPS) и прочее офисное оборудование; газоразрядные лампы и другие нелинейные электропотребители. Дело в том, что для электропитания вышеперечисленной техники используются встроенные импульсные источники питания (рис. 1), представляющие собой нелинейные нагрузки, сопротивление которых изменяется с течением времени.



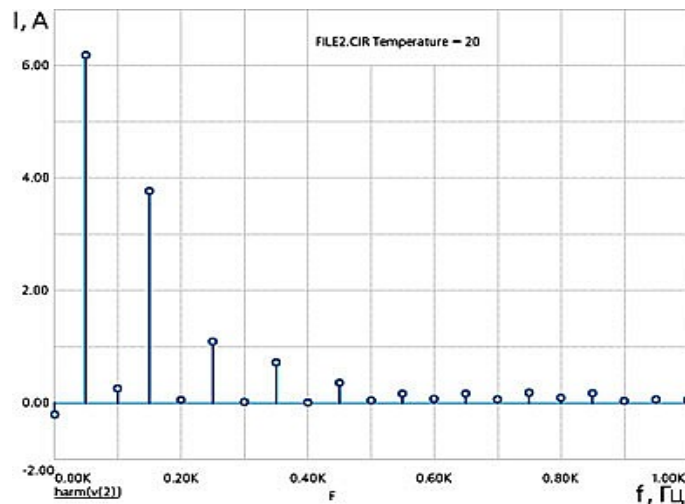
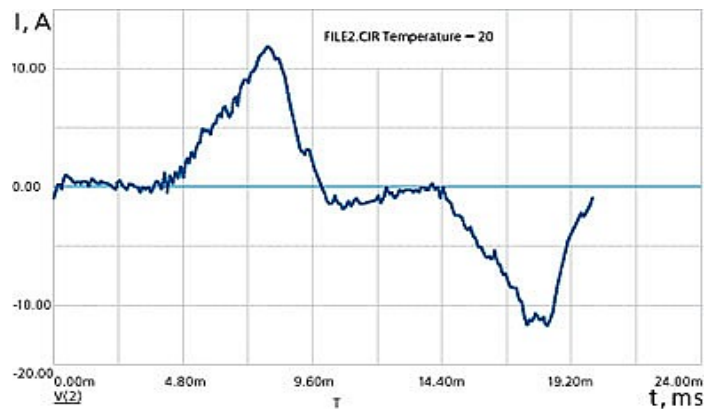
Ток, потребляемый этими источниками, имеет ярко выраженный импульсный характер. Это объясняется схемными особенностями импульсных источников питания, а именно наличием сетевого выпрямителя (диодного моста) и сглаживающего емкостного фильтра. При приближении кривой питающего напряжения к максимальному значению электронные вентили диодного моста скачкообразно меняют свое сопротивление от бесконечности до определенного малого значения. Такой характер изменения сопротивления вентилей равносителен включению или отключению им нагрузки. Таким образом, периодическое включение и отключение приводит к появлению коротких импульсов потребляемого тока (рис. 2, 3).

## Компьютер в нагрузку.

Автор: Олег Григорьев



Эти токи представляют собой несинусоидальный периодический сигнал, который можно представить в виде суммы постоянной величины и бесконечного ряда синусоидальных сигналов с кратными частотами.



На рис. 3 кривая тока, потребляемого системным блоком компьютера, разложена в гармонический ряд. Хорошо видно, что третья гармоника составляет 80% от величины основной гармоники частотой 50 Гц. Такие синусоидальные составляющие называются гармоническими, или гармониками. Синусоидальная составляющая, период которой равен периоду промышленной частоты - 50 Гц, называется основной или первой гармоникой. Остальные составляющие синусоиды с частотами со второй по n-ую называют высшими гармониками.

## Компьютер в нагрузку.

Автор: Олег Григорьев

Если мощность нелинейных электропотребителей не превышает 10-15%, сюрпризов при эксплуатации системы электроснабжения, как правило, не возникает. При превышении указанного предела следует ожидать различных проблем в эксплуатации, а также последствий, причины которых не являются очевидными. Для зданий, имеющих долю нелинейной нагрузки выше 25%, отдельные проблемы могут проявиться сразу.

Наличие высших гармонических составляющих в токах нелинейных электропотребителей приводит к следующим негативным, а в ряде случаев - и катастрофическим последствиям.

### Перегрев нулевых рабочих проводников

Возможен и весьма вероятен перегрев и разрушение нулевых рабочих проводников кабельных линий вследствие их перегрузки токами третьей гармоники, 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 [5]). Необходимо также отметить ускоренное старение изоляции при повышении рабочей температуры 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, то есть потребляемый электроприемниками ток в своем гармоническом составе содержал лишь основную гармонику (50 Гц). Следовательно, ток в нулевом рабочем проводнике не мог превосходить ток в наиболее нагруженной фазе, то есть защита, установленная 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, а также 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 (в пределе в 1,73 раза), поэтому значения длительно допустимых токов в случае нелинейных электропотребителей должны быть снижены.

Следует напомнить, из-за чего 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, то есть в любой момент времени имеют 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:

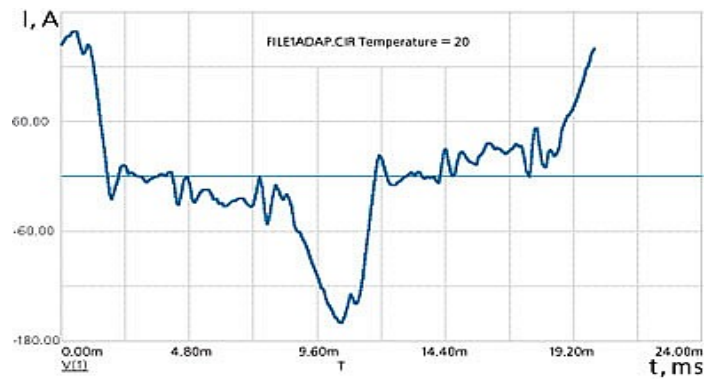
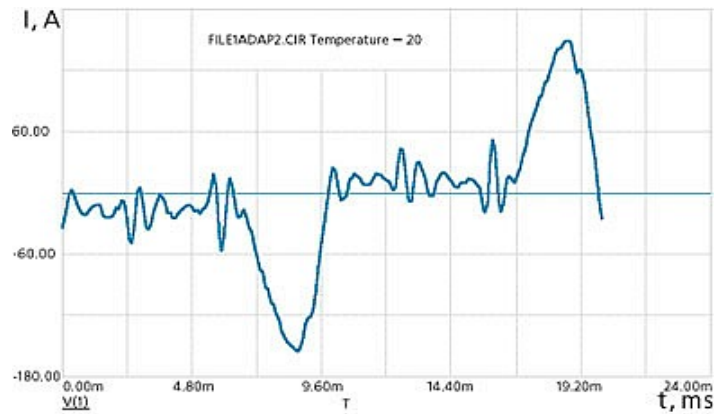
$$I_n = 3 \cdot \sqrt{I_3^2 + I_9^2 + I_{15}^2 + \dots}$$

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

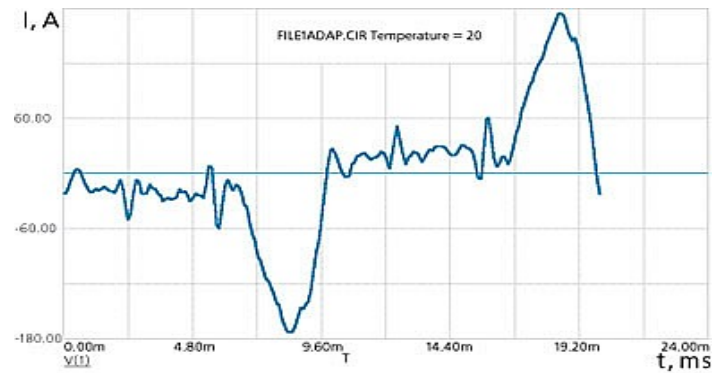
При линейной, даже самой мощной нагрузке ток в нулевом рабочем проводнике будет меньше, чем максимальный ток в фазных проводниках. Совсем иная ситуация при наличии нелинейных нагрузок, в этом случае ток в нулевом рабочем проводнике может превышать ток в фазе более чем в 1,5 раза.

## Компьютер в нагрузку.

Автор: Олег Григорьев

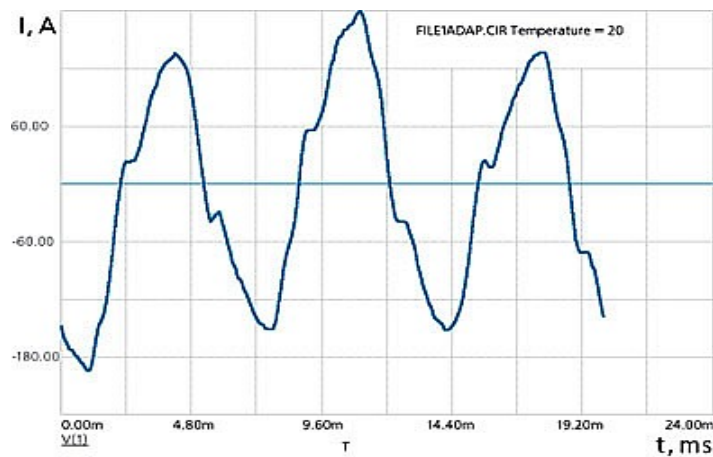


Об этом красноречиво говорят осциллограммы токов на фидерах питания компьютерных электропотребителей, представленные на рис. 4-7. Начиная с этих рисунков и далее все осциллограммы приводятся из базы данных Центра электромагнитной безопасности ([www.tesla.ru](http://www.tesla.ru)) и получены на объектах г. Москвы.



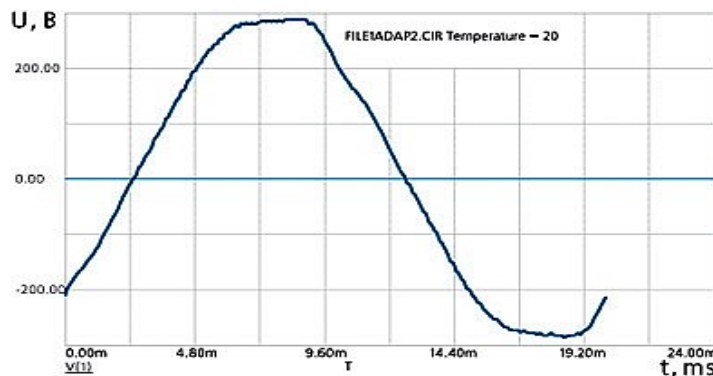
## Компьютер в нагрузку.

Автор: Олег Григорьев



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

### Искажение синусоидальности напряжения



Следствием характера тока, потребляемого импульсной нагрузкой, является деформация синусоиды напряжения, действующего на зажимах нагрузки (рис. 8). Синусоида напряжения становится «плоской» по форме, так как в момент импульса тока увеличивается падение напряжения на внутреннем сопротивлении сети:

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

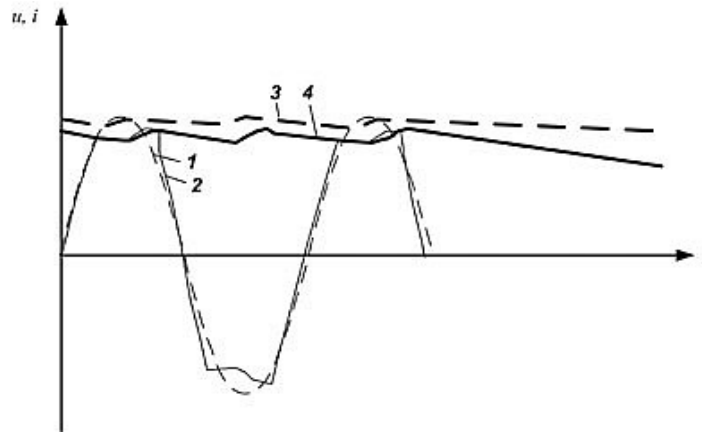
где  $U_{\text{нагрузки}}(t)$  - деформированная синусоида напряжения на зажимах нагрузки;  $U_{\text{сети}}(t)$  - синусоидальное напряжение питающей сети;  $i(t)$  - импульсный ток нагрузки;  $Z_{\text{сети}}$  - полное сопротивление сети со стороны зажимов нагрузки.

Если предположить, что сопротивление сети относительно зажимов каждого отдельного электропотребителя равно нулю, то проблемы искажения синусоидальности напряжения не существовало бы. Но 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 имеющее форму «плоской» синусоиды.

Рассмотрим последствия воздействия «плоской» синусоиды на импульсный источник питания.

Прежде всего уплощение синусоиды приводит к снижению уровня выпрямленного напряжения. В течение каждого полупериода питающего напряжения сглаживающий конденсатор заряжается до амплитудного значения. В

течение следующего промежутка времени он разряжается, поддерживая на достаточном уровне напряжение на шинах цепей постоянного тока. Если на зажимах импульсного источника питания действует идеальная синусоида напряжения, то конденсатор в течение части времени разряда действительно может поддерживать напряжение на достаточном уровне, так как предварительно был заряжен до необходимого амплитудного значения.



**Рис. 9.** 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.

Деформация синусоиды питающего напряжения приводит к снижению значения амплитуды входного напряжения. Как следствие, снижается напряжение на конденсаторе (рис. 9). 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.

Очень неприятное последствие - 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 приведет к увеличению тока, потребляемого высокочастотным преобразователем в среднем за период и увеличению скорости разряда конденсатора.

Большой ток, потребляемый высокочастотным преобразователем, означает увеличение тепловых потерь в элементах импульсного источника питания. Так, снижение входного напряжения на 10% вызовет увеличение тока на 11%, а тепловых потерь - на 23%.

Наконец, плоская синусоида влечет снижение устойчивости к кратковременным провалам напряжения. Устойчивостью работы импульсных источников питания при кратковременных провалах напряжения объясняется, например, возможность продолжения нормальной работы компьютеров при мерцании ламп накаливания. В случае провала или даже полного исчезновения напряжения на зажимах импульсного источника питания цепи постоянного тока могут продолжать 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:

$$W = \frac{CU^2}{2}$$



## Компьютер в нагрузку.

Автор: Олег Григорьев

При синусоидальной форме кривой питающего напряжения конденсатор может зарядиться до напряжения большего, чем он может зарядиться при «плоской» форме питающего напряжения. Таким образом, запасаемая в конденсаторе энергия при синусоидальном напряжении будет больше, чем при «плоском». Для поддержания нормальной работы цепей постоянного тока до момента восстановления питающего напряжения в случае его кратковременного провала или исчезновения запасенной в конденсаторе энергии может не хватить. Очевидно, что вероятность такого события повышается при «плоской» синусоиде питающего напряжения.

### Лишние потери в трансформаторах

Гармоники, генерируемые нелинейной нагрузкой, создают дополнительные потери в трансформаторах, что может повлечь значительный перерасход энергии и быть причиной выхода из строя трансформаторов вследствие перегрева.

Протекание по обмоткам трансформатора несинусоидальных токов, вследствие поверхностного эффекта и эффекта близости, приводит к увеличению активного сопротивления обмоток трансформатора, а значит - к дополнительному нагреву и уменьшению срока его службы.

Зависимость срока службы трансформатора от нагрева его частей не позволяет при несинусоидальном токе использовать трансформатор на всю номинальную мощность, ее приходится занижать. Например, полная загрузка трансформатора может наступить при использовании лишь 80% номинальной мощности, указанной в паспортных данных. Превышение этого уровня приведет к быстрому снижению срока службы трансформатора, так как будет превышен предел температуры. Превышение температуры на следующие 10 градусов сокращает срок службы трансформатора примерно в два раза. Если не учитывать превышение температуры и попытаться использовать трансформатор «в соответствии» с номинальными данными, срок его службы может сократиться с 40 лет до 40 дней.

Кроме того, высокочастотные гармоники тока являются причиной появления вихревых токов в обмотках трансформатора, что также вызывает дополнительные потери мощности и перегрев трансформатора.

Для линейных нагрузок потери на вихревые токи составляют довольно малую долю в общих потерях (приблизительно 5%). С нелинейной нагрузкой они становятся более значительными и иногда возрастают в 15-20 раз [6].

### Ухудшение условий работы конденсаторов

В условиях несинусоидальности тока ухудшаются условия 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, абсорбирующими гармоники со всей сети, так как сопротивление конденсатора обратно пропорционально частоте :

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

где  $f$  - основная частота, Гц;  $f_n$  - 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 могут возникать резонансные явления (как по току, так и по напряжению) на отдельных элементах системы электроснабжения.

### Тепловое и электрическое старение изоляции

Из-за интенсификации теплового и электрического старения изоляции срок службы электрооборудования может заметно сократиться. При рабочих температурах в изоляционных материалах протекают химические реакции, приводящие к постепенному изменению их изоляционных и механических свойств. С ростом температуры эти процессы ускоряются, сокращая срок службы оборудования. В конденсаторах потери энергии пропорциональны частоте, поэтому несинусоидальный ток приводит к дополнительному нагреву конденсаторов. 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 заключается 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 увеличению диэлектрических потерь и в конечном счете - к сокращению срока службы.

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

### Необоснованное срабатывание предохранителей

Необоснованное срабатывание предохранителей и автоматических выключателей имеет место вследствие дополнительного нагрева внутренних элементов защитных устройств, обусловленного протеканием несинусоидальных токов и, следовательно, действием поверхностного эффекта и эффекта близости.

### Помехи в сетях телекоммуникаций

Помехи в сетях телекоммуникаций могут возникать там, где силовые кабели и кабели телекоммуникаций расположены в относительной близости. 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 наибольшую роль в проблеме влияния на телекоммуникации играют гармоники, кратные трем. Чем выше порядок гармоники, тем больше уровень помех, наведенных ими в телекоммуникационных кабелях.

Как же определить наличие несинусоидальных токов в системах электроснабжения зданий?

Обычно для измерения токов используются токоизмерительные клещи. Однако если обхватить нулевой рабочий проводник «обычными» токоизмерительными клещами, может оказаться, что последние покажут неверный результат. Дело в том, что такие токоизмерительные клещи 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% выше и с большей степенью вероятности 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).

Учитывая, что большинство офисов располагается в зданиях, построенных 20-30 лет назад, спроектированных и смонтированных для эксплуатации линейных электропотребителей, а также учитывая значительный рост нелинейных нагрузок в последнее время, необходим особый и сугубо профессиональный подход к эксплуатации систем электроснабжения таких зданий.

Безусловно, менталитет большинства руководителей эксплуатирующих служб в нашей стране требует дожидаться изменений в действующей нормативной базе, прежде всего в ПУЭ. И конечно, можно ждать, пока «грянет гром»,



## Компьютер в нагрузку.

Автор: Олег Григорьев

особенно если оборудование, здание, прямые и косвенные потери, включая упущенную выгоду за время простоя, застрахованы от «необъяснимых» аварий в системе электроснабжения здания.

Тем не менее, мы разработали алгоритм действий и предложений, предназначенных для реализации на серьезных объектах, где тратят деньги на предупреждение проблем, а не на ликвидацию их последствий. Приводим их ниже.

- Выделить полную номенклатуру всех электропотребителей общего назначения, относящихся к категории нелинейных и вызывающих генерацию повышенной доли высших гармоник в сетях электроснабжения.
- На объектах, где доля установленной мощности нелинейных электропотребителей превышает 10%, в целях предупреждения развития пожароопасных и аварийных ситуаций провести диагностику состояния и прогнозирование 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.
- Учитывать фактор влияния 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.
- Выполнять прогнозирование возможных последствий роста компьютерных нагрузок при расширении компьютерных сетей и особенно при использовании существующей системы электроснабжения (без ее модернизации).
- При проведении работ по диагностике и анализу систем электроснабжения в дополнение к действующим нормативным документам использовать стандарт США IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial Power System Analysis, IEEE Std 399-1997.

### Список литературы:

- [1] Harmonic Trend in the USA: A Preliminary Survey. I.M. Nejdawi, A.E. Emanuel, D.J. Pileggi, M.J. Corridori, R.D. Archanbeault.//IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, #4, 1999, pp. 1488-1494
- [2] IEEE STD 399-1997, IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial Power Systems Analysis (IEEE Brown book) (ANSI).
- [3] IEEE STD 1100-1999, IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment (IEEE Emerald book) (ANSI).
- [4] ГОСТ 13109-97 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения»
- [5] Правила устройства электроустановок. Издание 6. - М.: Главгосэнергонадзор России, 1998.
- [6] Harmonic Mitigating Transformer Energy Saving Analysis. MIRUS International Inc. Oct., 1999.
- [7] Evaluating Harmonic Concerns With Distributed Loads, Mark McGranaghan, Electrotek Concepts, Knoxville, Tenn., Nov. 2001.
- [8] Treating Harmonics in electrical distribution system, Victor A. Ramos JR. Computer Power & Consulting, January, 1999.
- [9] Правила эксплуатации электроустановок потребителей. - М.: Энергоатомиздат, 1999.
- [10] Суднова В.В. Качество электрической энергии. - М.: Энергосервис, 2000.
- [11] Карташев И.И., Зуев Э.Н. Качество электроэнергии в системах электроснабжения. Способы его контроля и обеспечения. - М.: Издательство МЭИ, 2001.