

## ПРОБЛЕМЫ ВЫСШИХ ГАРМОНИК В СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Уровень сложности оборудования в сфере компьютерных технологий постоянно повышается. Поэтому системы обеспечения качества электроснабжения (например, **Источники Бесперебойного Питания, ИБП/ UPS**) должны быть разработаны таким образом, чтобы они были способны справиться с широким спектром проблем, начиная от провалов, колебаний, выбросов напряжения, высокочастотных шумов, импульсных помех и заканчивая обеспечением электропитанием при полном отсутствии напряжения промышленной сети. Одну из таких проблем представляют искажения формы напряжения, вызванные гармоническими составляющими тока, потребляемого нелинейной нагрузкой.

Большая часть компьютерного и офисного оборудования представляет собой нелинейную электрическую нагрузку, что создает искажения в питающей сети. Суммарный эффект этих нагрузок выражается в искажении напряжения, которое воздействует на другое оборудование, получающее электропитание от того же источника. Это может вызывать перегрев и рассинхронизацию в других устройствах, сбои в коммуникациях и сетях передачи данных, повреждении аппаратуры и другие нежелательные эффекты.

Степень искажений может быть определена коэффициентом искажения синусоидальности  $K_i$  – отношением действующего значения высших гармонических к действующему значению основной (первой) гармоники [1] и коэффициентом амплитуды (крест-фактором) нагрузки  $K_a$  – отношением пикового значения потребляемого тока к его действующему значению.

### Эффекты, вызываемые высшими гармониками напряжения и тока.

Последние могут быть разделены на эффекты мгновенного и длительного возникновения.

Проблемы мгновенного возникновения включают:

- искажение формы питающего напряжения;
- падение напряжения в распределительной сети;
- эффект гармоник, кратных трем (в трехфазных сетях);
- резонансные явления на частотах высших гармоник;
- наводки в телекоммуникационных и управляющих сетях;
- повышенный акустический шум в электромагнитном оборудовании;
- вибрация в электромашинах.

Проблемы длительного возникновения включают:

- нагрев и дополнительные потери в трансформаторах и электрических машинах;
- нагрев конденсаторов;
- нагрев кабелей распределительной сети.

Рассмотрим подробнее причины возникновения указанных эффектов и возможные пути и средства их решения.

### Форма питающего напряжения.

Повышенное значение коэффициента амплитуды указывает на то, что имеется большой пик потребляемого тока за половину периода сетевой частоты. Чем выше пиковое значение тока и меньше его длительность за полупериод напряжения сети, тем больше его искажение. Коэффициент амплитуды тока данной нагрузки изменяется в зависимости от характера источника электропитания, в то время как способность самого источника к обеспечению нагрузок с большим коэффициентом амплитуды определяется его полным внутренним сопротивлением и его способностью обеспечивать пиковые значения потребляемого от него тока.

Для многих устройств, выполняющих функции источников электропитания, такая способность может быть достигнута только путем завышения номинальных параметров этого оборудования. В частности, в современных генераторных установках переменного тока сверхпереходное реактивное сопротивление составляет приблизительно 15%, что производит достаточно неблагоприятное воздействие на форму напряжения, если не используются специальные обмотки или мощность генератора не будет выбрана заведомо завышенной.

Современные **Источники бесперебойного питания** (ИБП /UPS) способны контролировать форму напряжения на каждом полупериоде синусоиды. В настоящее время в подавляющем большинстве систем бесперебойного питания практически любой мощности используются инверторы на биполярных транзисторах с изолированным затвором (IGBT) при высокочастотном широтно-импульсном методе их управления. Такие системы обладают способностью питания нагрузок с высокими коэффициентами амплитуды тока (3 и выше) за счет переключений на высокой частоте и корректировке формы напряжения на каждом полупериоде. Эта способность отдавать ток с высокими пиковыми значениями может приводить к тому, что форма напряжения на выходе **ИБП** с двойным преобразованием энергии заметно лучше, чем у промышленной сети на входе системы.

### Падения напряжения в распределительной сети.

Большинство **ИБП** способно питать нагрузки с высоким значением коэффициента амплитуды, причем коэффициент искажения синусоидальности напряжения не превышает 3-6 %. Однако это уровень искажений напряжения, получаемый при замерах на выходных клеммах самих ИБП, но не в местах подключения нагрузки.

Следует учитывать, что форма тока из-за высокого процентного содержания высших гармоник будет сильно отличаться от синусоидальной. Формы токов для однофазного (рис. 1) и трехфазного (рис. 2) выпрямителей характеризуются определенным процентным содержанием нечетных высокочастотных гармоник (таблица 1). [ 3 ] Соответствующие спектры таких токов приведены на рис. 3.

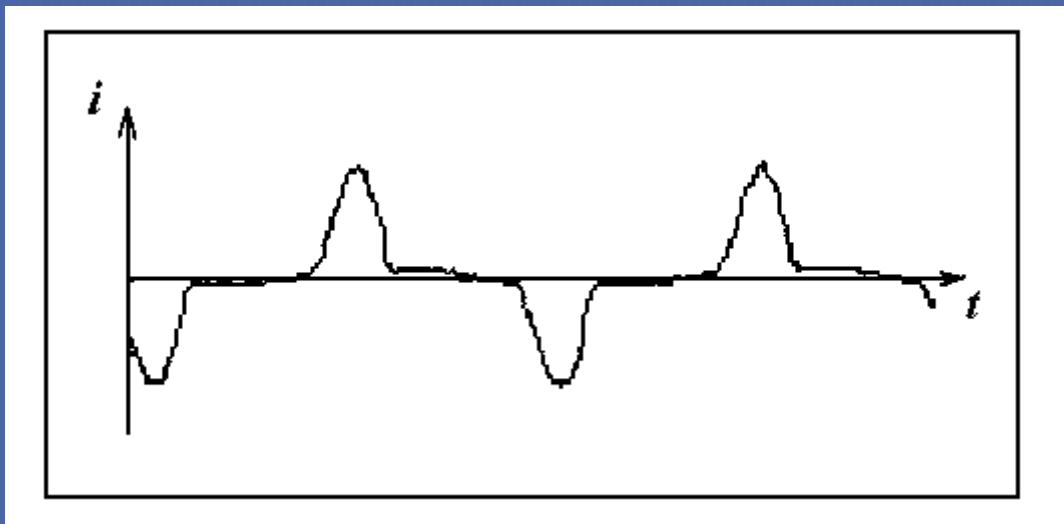


Рис.1. Форма тока однофазного выпрямителя.

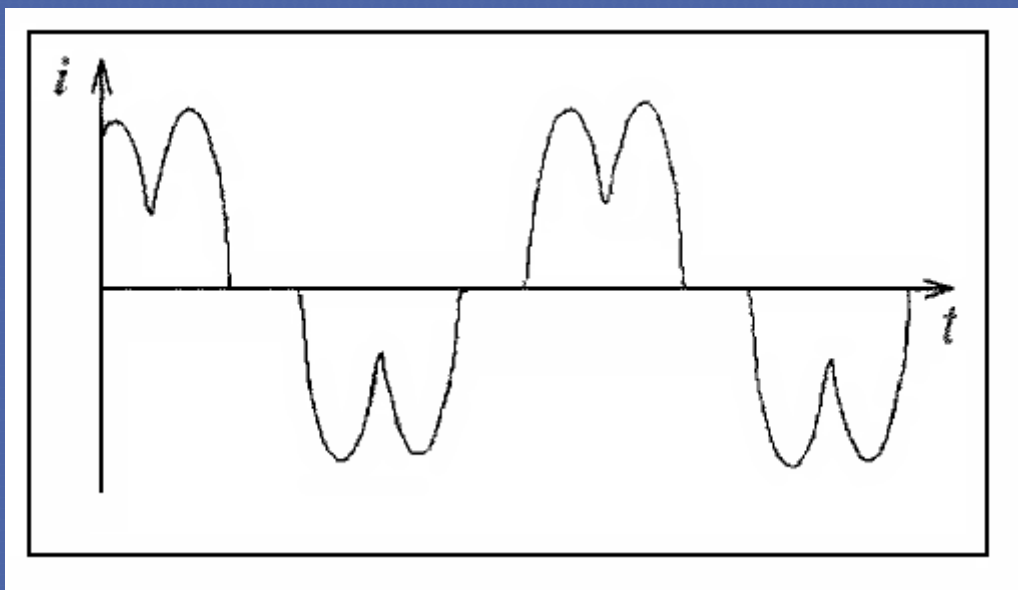
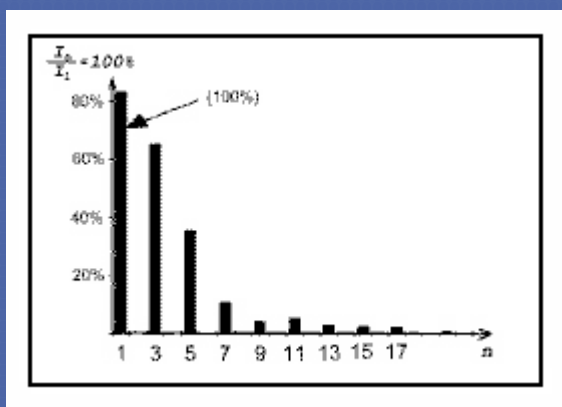
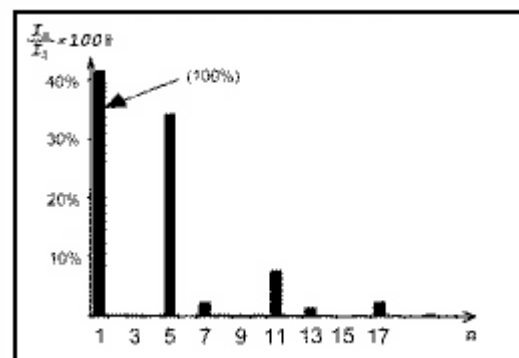


Рис.2. Форма тока трехфазного выпрямителя.



а)



б)

Рис.3. Спектры входных токов выпрямителей:

а) однофазного, б) трехфазного.

Таблица 1. Спектральный состав тока на входе ИБП (пример – при 100% нагрузке для ИБП без входного фильтра и корректора коэффициента мощности)

| гармоники, n | Однофазный ИБП, $I_n / I_1$ (%) | Трехфазный ИБП, $I_n / I_1$ (%) |
|--------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 1            | 100                             | 100                             |
| 3            | 65,7                            | -                               |
| 5            | 37,7                            | 33                              |
| 7            | 12,7                            | 2,7                             |
| 9            | 4,4                             | -                               |
| 11           | 5,3                             | 7,3                             |
| 13           | 2,5                             | 1,6                             |
| 15           | 1,9                             | -                               |
| 17           | 1,8                             | 2,6                             |

Полное сопротивление распределительной сети имеет в значительной степени индуктивный характер. Поэтому при очень высоком содержании гармоник токов соответствующее падение напряжения на кабелях и проводах становится намного выше предельно допустимых значений [ 1 ], и в типичных распределительных системах с кабельными трассами длиной более 100 метров может происходить сильное искажение напряжения на нагрузке. Примером таких искажений может служить графики тока и напряжения на входе однофазного выпрямителя в зависимости от величины относительной реактивной составляющей сопротивления входного фидера или внутреннего сопротивления источника питания выпрямителя (рис. 4) [ 4 ].

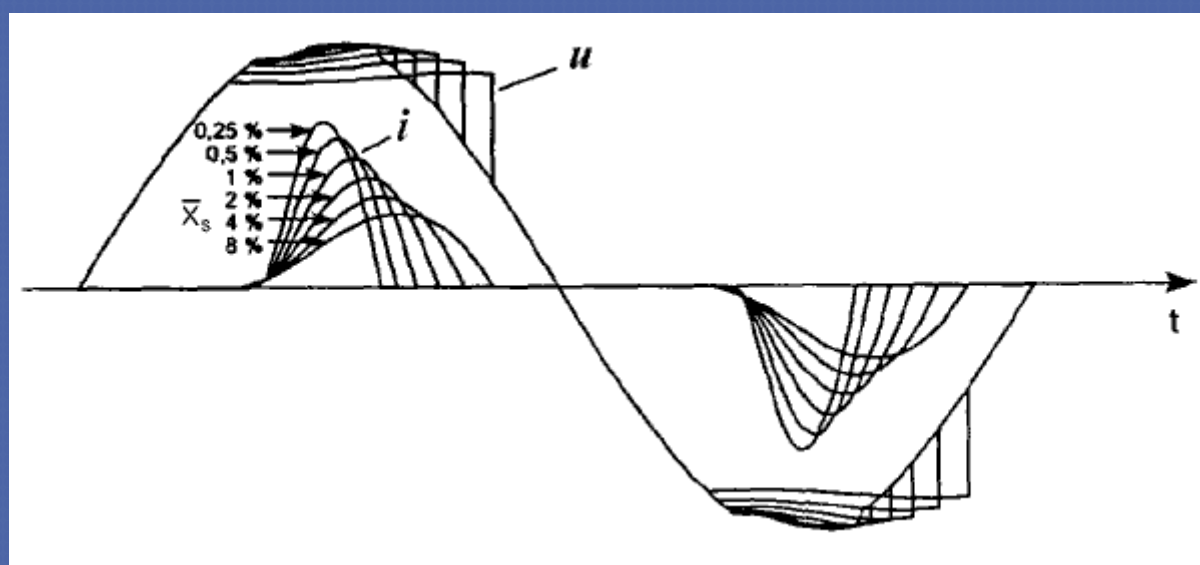


Рис.4. Формы напряжения и тока на входе бестрансформаторного однофазного выпрямителя в зависимости от относительной реактивной составляющей сопротивления входного фидера.

## Эффект гармоник кратных третьей.

Высшие гармоники тока кратные трем (т.е. 3, 9, 15, 21 и т. д.), определяющие высокое значение коэффициента амплитуды и генерируемые однофазными нагрузками, имеют специфическое результирующее воздействие в трехфазных системах. В сбалансированной (симметричной) трехфазной системе гармонические (синусоидальные) токи во всех трех фазах сдвинуты на 120 градусов по отношению друг к другу, и в результате сумма токов в нейтральном проводнике равна нулю. Следовательно, не возникает и падения напряжения на проводнике нейтрали в кабеле.

Это утверждение остается справедливым для большинства гармоник. Однако некоторые из них имеют направление вращения вектора тока в ту же сторону, что и основная гармоника (первая, "фундаментальная", т.е. 50 Гц), то есть они имеют прямую последовательность. Другие же вращаются в обратном направлении и, таким образом, имеют обратную последовательность. Это не относится к гармоникам, кратным третьей:

$$n = 3 (2 k + 1) , \text{ где } k = 0, 1, 2, \dots (1)$$

В трехфазных цепях они сдвинуты на 360 градусов друг к другу, совпадают по фазе и образуют нулевую последовательность. Нечетные гармоники, кратные третьей, суммируются в проводнике нейтрали (рис. 5).

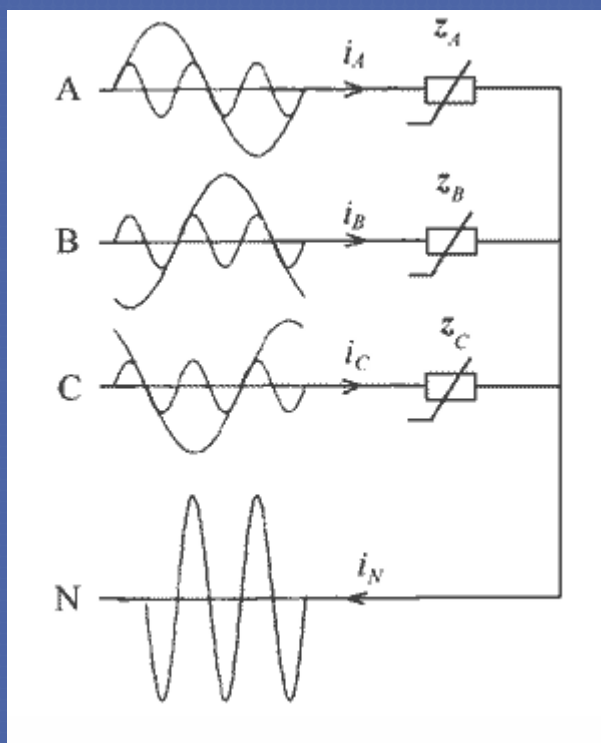


Рис.5. Процесс формирования тока нейтрали при нелинейной нагрузке.

В результате, с учетом того, что они составляют большую долю в действующем значении фазных токов, общий ток в нейтрали может превышать фазные токи.

$$I_N = 3 \sqrt{I_3^2 + I_9^2 + I_{15}^2 + \dots} (2)$$

Так, например, при фазных токах равных 37 А, ток нейтрали составляет 55 А при частоте, равной 150 Гц. [ 2 ]. Неправильно спроектированные четырехпроводные кабели трехфазных сетей могут перегреваться вплоть до воспламенения, под-

тверждая тем самым необходимость увеличения сечения проводников нейтрали трехфазных кабелей сети электропитания компьютерного оборудования. Гармоники, кратные третьей, приводят к падениям напряжения как в нейтрали, так и в фазных проводниках, вызывая искажения формы напряжения на других нагрузках, подключенных к этой сети.

Кроме указанного выше, в межфазных напряжениях трехфазной сети будут отсутствовать гармоники, кратные трем, в связи с чем соотношение между фазным и междуфазным напряжений при несинусоидальных тока становится меньше, чем  $\sqrt{3}$ .

### **Резонансные явления на частотах высших гармоник.**

При наличии высших гармоник в электрических цепях со сосредоточенными и распределенными параметрами, какими могут быть представлены блоки, узлы и распределительные сети системы электропитания, возникает опасность появления резонансных явлений. При возникновении резонансного или близкого к нему режима на какой-либо высшей гармонике тока или напряжения эта составляющая оказывается больше, чем амплитудное значение первой гармоники тока (напряжения) на тех же участках цепи. Это отрицательным образом может отразиться на работоспособности отдельных элементов и узлов системы.

### **Наводки в телекоммуникационных и управляющих сетях.**

Когда телекоммуникационные или управляющие сети проходят вблизи силовых сетей, по которым протекают токи высших гармоник, в первых могут наводиться помехи и искажения информационного сигнала. Величина искажения будет зависеть от частоты высших гармоник, длины параллельных участков сетей и расстояния между ними.

### **Акустический шум.**

В трансформаторах, дросселях и других электромагнитных элементах высшие гармоники тока, создавая электродинамические усилия, вызывают дополнительные акустические шумы.

### **Вибрация в электромашинных системах.**

Наличие высших гармоник в напряжении питания индукционных электродвигателей является причиной возникновения в магнитном потоке составляющих на частотах высших гармоник, которые в свою очередь будут наводить гармоники ЭДС и, как следствие этого, в обмотках ротора появляются высшие гармоники тока. Эти гармоники будут взаимодействовать с основным магнитным потоком, создавая дополнительные механические моменты на валу электрической машины. В результате создаются гармонические пульсации вращающего момента на валу двигателя. В экстремальных случаях может возникнуть вибрация на резонансной частоте вращающейся массы ротора, приводящая к накоплению усталости металла и возможному разрыву вала ротора электродвигателя [ 5 ].

## **Нагрев и дополнительные потери в трансформаторах и электрических машинах.**

Дополнительные потери, вызывающие перегрев трансформаторов при наличии высших гармоник, возникают из-за скин-эффекта в меди обмотки (увеличение активного сопротивления обмотки с ростом частоты), а также увеличением потерь на гистерезис и вихревые токи в магнитопроводе трансформатора.

В электрических машинах, кроме аналогичных потерь в статоре (потери в меди и магнитопроводе), из-за значительной разнице в скоростях вращающихся магнитных полей, создаваемых высшими гармониками, и скоростью вращения ротора возникают дополнительные потери в демпферных обмотках ротора и магнитопроводе электрической машины [ 6 ].

### **Нагрев конденсаторов.**

Дополнительные потери при наличии высших гармоник в конденсаторах обусловлены увеличением "угла потерь" в диэлектрике и ростом действующего значения тока конденсатора. Возникающий перегрев в конденсаторе может приводить к пробою диэлектрика. Кроме этого, конденсаторы чувствительны к перегрузкам, вызываемым присутствием высших гармоник напряжения.

### **Нагрев кабелей распределительной сети.**

Дополнительные потери в кабелях силовой сети, приводящие к повышению температуры проводников, при наличии высших гармоник тока вызываются следующими основными причинами :

- увеличением действующего значения негармонического тока;
- увеличением активного сопротивления проводника из-за скин-эффекта;
- увеличением потерь в диэлектрике изоляции кабеля.

## ВОЗМОЖНЫЕ СРЕДСТВА РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ

Различные методы могут использоваться, чтобы попытаться ослабить влияние проблем, вызываемые высшими гармониками тока при нагрузках с высоким значением коэффициента амплитуды.

### Обеспечение симметричного режима работы трехфазной системы.

В первую очередь необходимо добиться, насколько это возможно, сбалансированности нагрузок по фазам. При этом обеспечивается минимальный ток в проводнике нейтрали и минимальное содержание гармоник в выходном напряжении **источников бесперебойного питания**. Соответствующие схемы контроля и управления в **ИБП** будут поддерживать номинальное действующее значение выходного напряжения, в то же самое время стремясь обеспечить его синусоидальную форму. Не всегда возможно одновременно выполнить обе эти функции. В общем случае несбалансированная нагрузка воздействует на напряжение, вызывая его искажение. Хотя оно и относительно мало по величине, но так же добавляется к общим искажениям в кабеле. Обычно преобладают те искажения напряжения, которые сгенерированы в распределительной сети.

Одним из рациональных способов симметрирования однофазных нагрузок в трехфазной сети является использование **ИБП** с двойным преобразованием энергии при трехфазном входе и однофазном выходе (3ф / 1ф). В этом случае разгружается нейтраль, т.к. она не участвует в работе трехфазного выпрямителя на входе **ИБП**, находящейся в нормальном режиме преобразования напряжения. Однако этот эффект пропадает при переходе **ИБП** на режим "Bypass".

### Включение в систему разделительного трансформатора с обмотками "треугольник-звезда".

Этот метод использовался на практике, но не всегда с успехом [ 7 ]. Предполагалось, что в этом случае трансформатор не пропускает гармоники, кратные третьей, и что отсутствие проводника нейтрали на стороне первичной обмотки исключает падение напряжения на нейтрали. Но такое утверждение оказалось правильным лишь частично. Сбалансированные гармоники, кратные третьей, наводят соответствующие магнитные потоки в стержнях сердечника трансформатора и, если они равны по величине и совпадают по фазе, то напряжения, наведенные в первичной обмотке, будут скомпенсированы.

Кроме этого любой трансформатор имеет индуктивность рассеяния, которая добавляется к существующему полному входному сопротивлению распределительной сети. Это может оказывать эффект уменьшения коэффициента амплитуды тока нагрузки и суммарного значения коэффициента искажений синусоидальности тока. Однако искажение напряжения увеличивается, а достижимое максимальное значение напряжения постоянного тока для питания инвертора **ИБП** снижается.

### Использование фильтров подавления гармоник.

Третья гармоника является доминирующей по своему наиболее неблагоприятному воздействию в однофазных цепях. Включение в схему фильтра, который имеет низкое полное сопротивление на частоте этой гармоники, понижает генерируемое нелинейной нагрузкой напряжение. Применение таких фильтров в случае систем бесперебойного питания наиболее успешно для компенсации эффекта несбаланси-

рованных нагрузок, которые имеют тенденцию генерировать высокие уровни гармоник. Фильтры могут быть установлены как внутри **ИБП**, так и расположены на выходном конце кабеля (т.е. на стороне нагрузки). Тогда токи третьей гармоники циркулируют между нагрузкой и фильтром, частично снижая суммарный ток в проводнике нейтрали.

Однако такое подключение не дает окончательного решения проблемы, если на выходе **ИБП** подключены распределенные нагрузки. Установленный таким образом фильтр защищает только часть нагрузки, к которой он непосредственно подключен. Поэтому схема подключения должна быть такой, чтобы фильтр защищал всю нагрузку, а не только ее часть. Это может вызвать затруднения по стоимости оборудования и необходимой занимаемой площади при расстановке дополнительных устройств в нескольких участках распределительной сети на различных этажах здания.

Особое значение имеют фильтры, устанавливаемые на входе **ИБП**. Шестиполупериодные (шестипульсные) выпрямители, применяемые в трехфазных ИБП, создают высокий уровень пятой гармоники тока в питающей сети. Для снижения гармонического состава потребляемого тока и повышения коэффициента мощности системы в фазные провода включают индуктивные сопротивления (дрессели). Повышением эффективности подавления высших гармоник тока является включение входного фильтра ИБП, настроенного на пятую гармонику.

### **Применение двенадцатиполупериодного выпрямителя в ИБП.**

Для снижения величины коэффициента искажения синусоидальности входного тока трехфазных ИБП до уровня менее 10% используют 12-полупериодные (12-пульсного) выпрямители.

### **Снижение полного сопротивления распределительной сети.**

Это один из эффективных методов снижения нелинейных искажений. Кабели и сборные шины имеют полное сопротивление, которое прямо связано с длиной линий. Увеличение сечения кабелей (проводов) снижает активное сопротивление распределительной сети, но не снижает ее индуктивность. Максимальное эффективное сечение жил кабелей (проводов) составляет приблизительно 95 кв. мм. [ 7 ] С дальнейшим увеличением сечения кабелей их индуктивность остается относительно постоянной. Очевидно, что более эффективным будет использование параллельно соединенных кабелей (проводов). При возможности использования децентрализованной системы бесперебойного питания следует рассмотреть разделение всего устанавливаемого оборудования (т.е. устройств, входящих в состав защищаемой нагрузки) на секции, каждая из которых будет запитана от отдельного **источника бесперебойного питания (ИБП)**.

Следует помнить о том, что во время профилактических, ремонтных и т.п. работ системы бесперебойного питания должны и могут быть переключены в режим обхода (Bypass). При этом возможно возрастание уровня искажений, т.к. нелинейная нагрузка напрямую будет подключена к первичному источнику переменного напряжения (генератор, трансформатор подстанции и т. п.). Форма напряжения сетевого электропитания часто бывает искажена из-за других нагрузок, не относящихся к критическим, но имеющих характеристики, подобные компьютерному и офисному оборудованию. Искажения формы напряжения электропитания, сгенерированные другим оборудованием, добавятся к искажениям от компьютерной нагруз-

ки, которая была переключена на питание непосредственно от сети (на время профилактики или ремонта ИБП), создавая, таким образом, более высокие уровни искажений.

Климов В.П., Москалев А.Д.

## ЛИТЕРАТУРА

ГОСТ 13109 - 97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

Капустин В.М., Лопухин А.А. Компьютеры и трехфазная электрическая сеть // Современные технологии автоматизации - СТА, №2, 1997, стр. 104-108.

Dugan R.C., McGranaghan M.F., Beaty H.W. Electrical Power Systems Quality. McGraw-Hill, 1996. – 265 стр.

Fiorina J.N. Inverters and Harmonics // Cahier Technique Merlin Gerin, no 159. - 19 стр.

Yacamini R. Power System Harmonics. Part 3 – Problems caused by distorted supplies // Power Engineering Journal, Oct., 1995, стр. 233-238.

Harmonic Disturbances in Networks and Their Treatment // Cahier Technique Schneider Electric, no 152. – 25 стр.

Forrester W. Networking in Harmony // Electrical Contractor, Nov. / Dec., 1996, стр. 38-39.

Статья взята с сайта <http://www.tensy.ru/>