

Глава М

Управление гармониками

Содержание		
1	Проблема: зачем нужно обнаруживать и устранять гармоники?	M2
2	Стандарты	M3
3	Общие положения	M4
4	Основные виды воздействий гармоник на электроустановки	M6
	4.1 Резонанс	M6
	4.2 Увеличенные потери	M6
	4.3 Перегрузки оборудования	M7
	4.4 Возмущения, влияющие на чувствительные нагрузки	M9
	4.5 Экономические последствия	M10
5	Основные показатели гармонических искажений и принципы их измерения	M11
	5.1 Коэффициент мощности	M11
	5.2 Крест-фактор	M11
	5.3 Параметры мощности и гармоники	M11
	5.4 Гармонический спектр и гармоническое искажение	M12
	5.5 Суммарный коэффициент гармонических искажений (THD)	M12
	5.6 Использование различных показателей	M13
6	Измерение показателей	M14
	6.1 Устройства, используемые для измерения показателей	M14
	6.2 Процедуры гармонического анализа распределительных сетей	M14
	6.3 Тщательный контроль гармоник	M15
7	Устройства обнаружения	M16
8	Способы ослабления гармоник	M17
	8.1 Основные рекомендации	M17
	8.2 Фильтрация гармоник	M18
	8.3 Метод	M20
	8.4 Модели фильтров	M20

M1

1 Проблема: зачем нужно обнаруживать и устранять гармоники?

Возмущения, вызываемые гармониками

Гармоники, протекающие по распределительным сетям, вызывают снижение качества электрической энергии, что может иметь ряд негативных последствий:

- перегрузки в распределительных сетях из-за увеличения действующего значения тока;
- перегрузки в нулевых (нейтральных) проводниках из-за суммирования токов высших гармоник, кратных трем, которые генерируются однофазными нелинейными нагрузками;
- перегрузки, вибрация и преждевременное старение генераторов, трансформаторов и электродвигателей, а также повышенный шум трансформаторов;
- перегрузки и преждевременное старение конденсаторов для повышения коэффициента мощности;
- искажение формы питающего напряжения, которое может повлиять на «чувствительные» нагрузки;
- помехи в сетях связи и телефонных линиях.

Экономические последствия гармонических возмущений

Гармоники имеют значительные экономические последствия:

- преждевременное старение оборудования означает необходимость его замены раньше запланированного срока, если в нем с самого начала не был предусмотрен запас мощности;
- перегрузки в распределительной сети могут привести к более высоким уровням потребления энергии и увеличению потерь;
- искажение формы кривой тока, способное вызывать ложное срабатывание автоматических выключателей, что может приводить к остановке производственного процесса.

Наращение степени серьезности последствий

Всего десять лет назад гармоники еще не считались реальной проблемой, поскольку их влияние на распределительные сети было в целом незначительным. Однако массовое внедрение силовой электроники в различные виды оборудования привело к тому, что наличие гармоник стало серьезно сказываться во всех секторах экономической деятельности.

Кроме того, оборудование, порождающее такие гармоники, часто является критически важным для компании или организации.

Какие гармоники нужно измерять и устранять?

Чаще всего в трехфазных распределительных сетях встречаются гармоники нечётного порядка. С увеличением частоты амплитуды гармоник обычно снижаются. Гармоники выше 50-го порядка имеют незначительную амплитуду, и дальнейшие измерения не имеют смысла. Достаточно точные результаты измерений получаются при измерении гармоник до 30-го порядка.

Энергоснабжающие компании контролируют содержание 3-й, 5-й, 7-й, 11-й и 13-й гармоник в питающих сетях. В целом, достаточным является устранение гармоник низших порядков (до 13-го). При более тщательном контроле учитываются гармоники до 25-й включительно.

2 Стандарты

Вопросы гармонических искажений в электрических сетях регламентируются различными стандартами и нормами:

- стандартами обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) распределительных сетей;
- нормативными требованиями к оборудованию, порождающему гармоники;
- рекомендациями энергоснабжающих компаний, применимыми к электроустановкам.

В настоящее время действует тройная система стандартов и норм, направленная на быстрое ослабление влияния гармоник и основанная на перечисленных ниже документах.

Стандарты, регламентирующие ЭМС распределительных сетей и изделий

Эти стандарты устанавливают необходимую совместимость распределительных сетей и электрооборудование:

- гармоники, порождаемые каким-либо устройством, не должны создавать в распределительной сети возмущения выше определенного уровня;
- каждое устройство должно сохранять работоспособность при наличии в питающей сети возмущений определенного уровня;
- стандарт МЭК 61000-2-2 для низковольтных систем энергоснабжения общего применения;
- стандарт МЭК 61000-2-4 для промышленных электроустановок низкого и высокого напряжения.

Стандарты, регламентирующие качество электрической энергии, обеспечиваемой распределительными сетями

- стандарт EN 50160 устанавливает характеристики электроэнергии, подаваемой распределительными сетями общего назначения;
- стандарт IEEE 519 представляет общий подход энергоснабжающих компаний и потребителей к ограничению влияния нелинейных нагрузок. Энергоснабжающие компании стимулируют принятие превентивных мер, призванных повысить качество электроэнергии, снизить рост температуры и уменьшить влияние на коэффициенты мощности. Они намерены в будущем штрафовать потребителей, являющихся основными источниками гармоник в питающей сети.

Стандарты, устанавливающие требования к оборудованию

- стандарт МЭК 61000-3-2 или EN 61000-3-2 для низковольтного оборудования с номинальным током менее 16 А;
- стандарт МЭК 61000-3-12 или EN 61000-3-4 для низковольтного оборудования с номинальным током более 16 и менее 75 А.

Максимально допустимые уровни гармоник

Проведенные международные исследования позволили собрать данные и оценить типичное содержание гармоник в распределительных электрических сетях. В таблице на **рис. М1** представлены уровни, которые, по мнению большинства энергоснабжающих компаний, не должны превышать.

Нечетные гармоники, не кратные трем				Нечетные гармоники, кратные трем				Четные гармоники			
Порядок гармоники, h	НН	СН	СВН	Порядок гармоники, h	НН	СН	СВН	Порядок гармоники, h	НН	СН	СВН
5	6	6	2	3	5	2.5	1.5	2	2	1.5	1.5
7	5	5	2	9	1.5	1.5	1	4	1	1	1
11	3.5	3.5	1.5	15	0.3	0.3	0.3	6	0.5	0.5	0.5
13	3	3	1.5	21	0.2	0.2	0.2	8	0.5	0.2	0.2
17	2	2	1	> 21	0.2	0.2	0.2	10	0.5	0.2	0.2
19	1.5	1.5	1					12	0.2	0.2	0.2
23	1.5	1	0.7					> 12	0.2	0.2	0.2
25	1.5	1	0.7								
> 25	0.2 + 25/h	0.2 + 25/h	0.1 + 25/h								

Рис. М1. Максимально допустимые уровни гармоник

М3

Присутствие гармоник говорит об искаженной форме тока или напряжения. Искажение же формы тока или напряжения означает наличие возмущений в распределительной сети и ухудшение качества поставляемой электроэнергии.

Источниками гармоник токов являются нелинейные нагрузки, подсоединенные к распределительной сети. Протекание гармоник токов по сети, имеющей некоторое полное сопротивление, приводит к появлению гармоник напряжений и соответственно к искажению формы питающего напряжения.

Происхождение гармоник

Устройства и системы, порождающие гармоники, имеются во всех секторах экономики, т.е. в промышленности, коммерческом секторе и жилищном хозяйстве. Гармоники порождаются нелинейными нагрузками, т.е. нагрузками, потребляющими ток с формой волны, отличающейся от формы волны питающего напряжения.

Примеры нелинейных нагрузок:

- промышленное оборудование (сварочные машины, электродуговые печи, индукционные печи и выпрямители);
- приводы с регулируемой скоростью для асинхронных двигателей или двигателей постоянного тока;
- источники бесперебойного питания;
- офисное оборудование (компьютеры, фотокопировальные машины, факсимильные аппараты и др.);
- бытовые электроприборы (телевизоры, микроволновые печи, люминесцентные лампы);
- некоторые устройства с магнитным насыщением (трансформаторы).

Возмущения, создаваемые нелинейными нагрузками: гармоники тока и напряжения

Нелинейные нагрузки потребляют токи гармоник, которые поступают в распределительную сеть. Гармоники напряжения вызываются протеканием токов гармоник по сопротивлениям питающих цепей (по трансформатору и распределительной сети для случаев аналогичных тому, который показан на **рис. M2**).

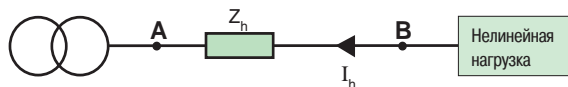


Рис. M2. Однолинейная схема, показывающая сопротивление питающей цепи для гармоники h -го порядка

Реактивное сопротивление проводника возрастает с увеличением частоты тока, протекающего по этому проводнику. Поэтому для каждой гармоники тока (h -ого порядка) в цепи питания существует некоторое полное сопротивление Z_h .

Когда по сопротивлению Z_h протекает ток гармоники h -го порядка, то, по закону Ома, он создает напряжение гармоники $U_h = Z_h \times I_h$. В результате этого форма напряжения в точке B искажается и отличается от синусоидальной. Все нагрузки, питающиеся через точку B, получают напряжение искаженной формы.

Для тока данной гармоники, это искажение пропорционально сопротивлению распределительной сети.

Протекание несинусоидальных токов в распределительных сетях

Можно считать, что нелинейные нагрузки генерируют токи высших гармоник в распределительную сеть в направлении источника питания.

На **рис. M3** и **L4** показана схема электроустановки, «загрязненной» гармониками. В схеме, изображенной на **рис. M3**, протекает ток частотой 50 Гц, а на **рис. M4** – ток частотой гармоники h -ого порядка.

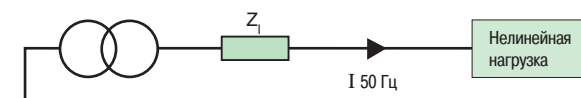


Рис. M3. Схема электроустановки, питающей нелинейную нагрузку, в которой протекает только ток основной частоты 50 Гц

3 Общие положения

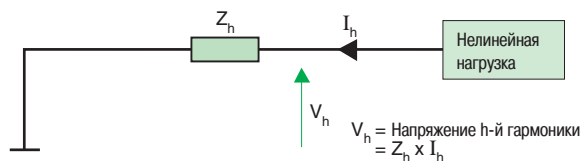
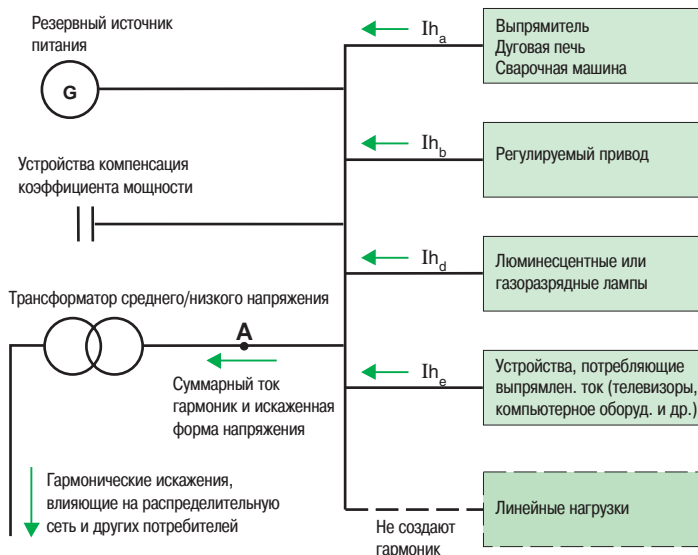


Рис. М4. Схема той же электроустановки, в которой протекает только ток h -й гармоники

При питании нелинейной нагрузки возникает ток частотой 50 Гц (как показано на рис. М3), к которому добавляются токи I_h (рис. М4), соответствующие каждой h -й гармонике.

По-прежнему считая, что нагрузки генерируют токи высших гармоник в распределительную сеть в направлении источника питания, можно построить схему протекания токов разных гармоник в этой сети (рис. М5).



Примечание: хотя на данной схеме определенные нагрузки генерируют токи гармоник в распределительную сеть, другие нагрузки могут поглощать такие токи.

Рис. М5. Протекание токов гармоник в распределительной сети

Основные экономические последствия гармоник для электроустановок:

- повышенный расход энергии;
- преждевременное старение оборудования;
- производственные убытки.

M5

4 Основные виды воздействий гармоник на электроустановки

4.1 Резонанс

Одновременное использование емкостных и индуктивных устройств в распределительных сетях приводит к параллельному или последовательному резонансу, который проявляется соответственно в очень больших и очень малых значениях полного сопротивления. Изменения сопротивления вызывают изменения тока и напряжения в распределительной сети. В данном разделе будет рассматриваться только параллельный резонанс, как наиболее распространенный.

Рассмотрим следующую упрощенную электрическую схему (рис. М6) электроустановки, состоящей из:

- питающего трансформатора;
- линейных нагрузок;
- нелинейных нагрузок, потребляющих токи высших гармоник;
- конденсаторов для повышения коэффициента мощности.

Ниже представлена эквивалентная схема для гармонического анализа (рис. М7). Если пренебречь активным сопротивлением R, то полное сопротивление Z определяется по формуле:

$$Z = \frac{jLs\omega}{1 - LsC\omega^2}$$

где:

Ls - индуктивность питающей сети (вышерасположенный участок сети + трансформатор + линия);

C - емкость конденсаторов для повышения коэффициента мощности;

R - активное сопротивление линейных нагрузок;

Ih - ток гармоник.

Резонанс наступает тогда, когда знаменатель $1 - LsC\omega^2$ стремится к нулю. Соответствующая частота называется резонансной частотой цепи. При этой частоте полное сопротивление достигает максимума, и возникают напряжения гармоник большой величины, приводящие к значительным искажениям формы питающего напряжения. Искажение формы напряжения сопровождается протеканием в цепи Ls+C токов гармоник, превышающих токи, потребляемые нагрузками.

В результате такая распределительная сеть и конденсаторы для повышения коэффициента мощности подвергаются воздействию больших токов гармоник и перегрузкам. Чтобы избежать резонанса, последовательно с такими конденсаторами можно установить дроссели для защиты от гармоник.

М6

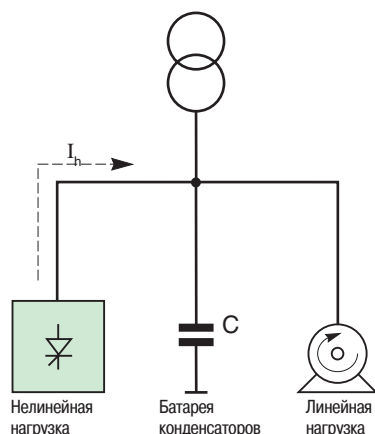


Рис. М6. Схема электроустановки

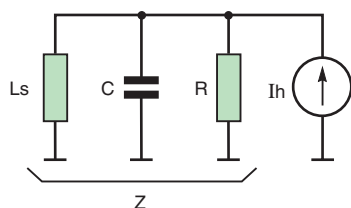


Рис. М7. Эквивалентная схема электроустановки, показанной на рис. М6

4.2 Увеличенные потери

Потери в проводниках

Активная мощность, переданная нагрузке, зависит от составляющей (I_1) тока основной сетевой частоты.

Когда ток, потребляемый нагрузкой, содержит гармоники, действующее значение тока Irms превышает ток основной гармоники I1.

Суммарный коэффициент гармонических искажений тока THD определяется выражением:

$$THD = \sqrt{\left(\frac{I_{rms}}{I_1}\right)^2 - 1}$$

$$\text{отсюда: } I_{rms} = I_1 \sqrt{1 + THD^2}$$

На рис. М8 показаны графики изменения следующих двух параметров в зависимости от суммарного коэффициента гармонических искажений:

- действующего значения тока Irms для нагрузки, потребляющей некоторый основной ток;
- джоулевых потерь (на нагрев) без учета поверхностного эффекта (точкой отсчета для обоих параметров является 1, соответствующая случаю отсутствия гармоник).

Токи гармоник вызывают увеличение джоулевых потерь во всех проводниках, в которых они протекают, и дополнительное повышение температуры в трансформаторах, устройствах, кабелях.

Потери в асинхронных машинах

Напряжения гармоники h-го порядка, поступающие к асинхронным машинам, генерируют в роторе токи с частотами выше 50 Гц, являющиеся причиной дополнительных потерь.

4 Основные виды воздействий гармоник на электроустановки

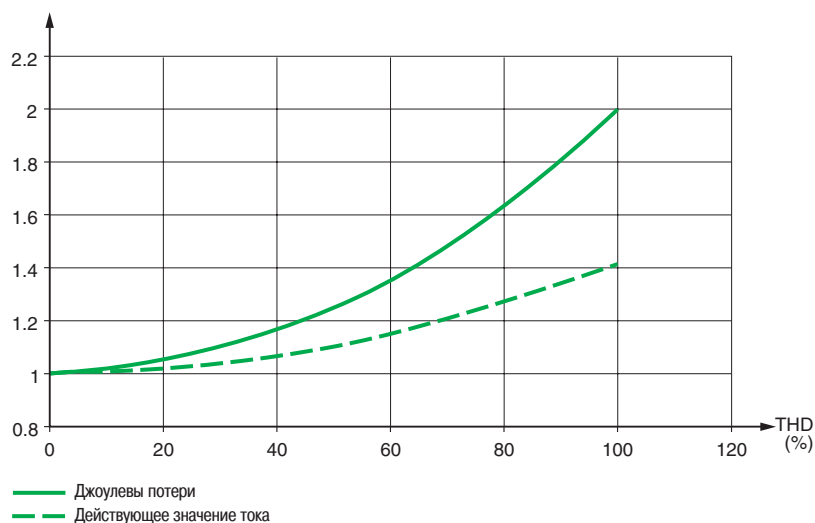


Рис. М8. Увеличение действующего значения тока и джоулевых потерь в зависимости от суммарного коэффициента искажений

Порядки величин

- питающее напряжение фактически прямоугольной формы вызывает **20-процентный** рост потерь;
- питающее напряжение, содержащее гармоники $u_5 = 8\%$ (от основного напряжения U_1), $u_7 = 5\%$, $u_{11} = 3\%$, и $u_{13} = 1\%$, т.е. с суммарным коэффициентом искажений $THDu = 10\%$ или, в соответствии с ГОСТ 13109-97, $K_u = 10\%$, приводит к дополнительным потерям в 6%.

Потери в трансформаторах

Токи гармоник, протекающие в трансформаторах, вызывают увеличение потерь в «меди» вследствие эффекта Джоуля и в «железе» из-за вихревых токов. Напряжения гармоник являются причиной потерь в «железе» вследствие гистерезиса.

Обычно считается, что потери в обмотках возрастают пропорционально квадрату $THDi$, а потери в сердечнике — пропорционально $THDu$.

В трансформаторах коммутационных электросетей, в которых уровни искажений ограничены, рост потерь составляет 10-15%.

Потери в конденсаторах

Напряжения гармоник, приложенные к конденсаторам, приводят к появлению токов, пропорциональных частотам этих гармоник. Эти токи вызывают дополнительные потери.

Пример

Питающее напряжение содержит следующие гармоники:

Основное напряжение U_1 , гармонические напряжения $u_5 = 8\%$ (от U_1), $u_7 = 5\%$, $u_{11} = 3\%$, $u_{13} = 1\%$, т.е. суммарный коэффициент искажений $THDu = 10\%$. Ток увеличивается в 1,19 раз, а джоулевы потери — в 1.19^2 , т.е. в 1,4 раза.

4.3 Перегрузки оборудования

Генераторы

Номинальные характеристики (параметры) генераторов, питающих нелинейные нагрузки, должны быть снижены из-за дополнительных потерь, обусловленных протеканием токов высших гармоник. Уровень снижения рабочих параметров генератора, 30% общей нагрузки которого приходится на нелинейные нагрузки, составляет около 10%. В связи с этим необходимо использовать генератор повышенной мощности.

Источники бесперебойного питания (ИБП)

Ток, потребляемый компьютерными системами, имеет очень большой крест-фактор (отношение величины амплитуды тока к его действующему значению). Поэтому источник бесперебойного питания, параметры которого выбирались с учетом только действующего значения тока, может не обеспечить необходимую амплитуду тока и оказаться перегруженным.

М7

Трансформаторы

■ Кривая, показанная ниже (рис. М9), отображает типичное требуемое снижение нагрузки трансформатора, питающего электронные приборы.

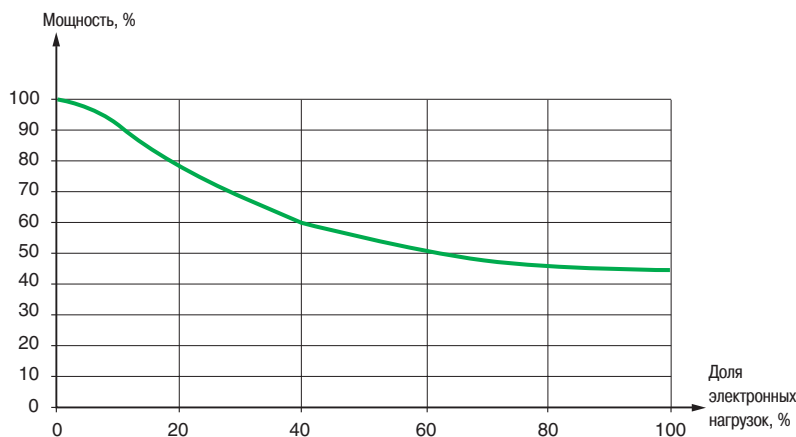


Рис. М9. Допустимая нагрузка трансформатора, питающего электронные приборы

Пример

Если 40% мощности нагрузки трансформатора приходится на электронные приборы, то его нельзя нагружать более 60% от номинала.

■ Стандарт УТЕ С15-112 устанавливает зависимость коэффициента снижения мощности трансформаторов от токов гармоник.

$$k = \frac{1}{\sqrt{1 + 0.1 \left(\sum_{h=2}^{40} h^{1.6} T_h^2 \right)}}$$

$$T_h = \frac{I_h}{I_1}$$

Типовые значения:

- ток прямоугольной формы (амплитуда гармоник - $1/h^1$): $k = 0.86$;
- ток преобразователя частоты (THD = 50%): $k = 0.80$.

Асинхронные машины

Стандарт МЭК 60892 вводит понятие взвешенного коэффициента гармоник HVF (коэффициента гармоник напряжений), формула и максимальное значение которого приведены ниже.

$$HVF = \sqrt{\sum_{h=2}^{13} \frac{U_h}{h^2}} \leq 0.02$$

Пример

Питающее напряжение имеет основное напряжение U_1 и гармонические напряжения $u_3 = 2\%$ (от U_1), $u_5 = 3\%$, $u_7 = 1\%$. Суммарный коэффициент искажений THDu = 3,7%, а HVF = 0,018. Это значение HVF очень близко к максимальному значению, при превышении которого необходимо проводить занижение номинальных характеристик рассматриваемой машины. В практическом смысле, при питании асинхронной машины THDu не должен превышать 10%.

Конденсаторы

В соответствии со стандартом МЭК 60831-1, действующее значение тока, протекающего через конденсаторы, не должно превышать номинальный ток более чем в 1,3 раза.

Возвращаясь к приведенному выше примеру, напряжения гармоник составляют: $u_5 = 8\%$ (от основного напряжения U_1), $u_7 = 5\%$, $u_{11} = 3\%$ и $u_{13} = 1\%$, т.е. суммарный коэффициент искажений

THDu равен 10%, и при номинальном напряжении $\frac{I_{rms}}{I_1} = 1.19$. При напряжении, превышающем номинальное напряжение на 10%, достигается предельное значение тока $\frac{I_{rms}}{I_1} = 1.3$ и необходимо использовать конденсаторы с повышенными характеристиками.

(1) Фактически, эта форма тока близкая к прямоугольной. Это характерно для всех выпрямителей тока (трехфазных выпрямителей, индукционных печей).

4 Основные виды воздействий гармоник на электроустановки

Нейтральные проводники

Рассмотрим систему, состоящую из симметричного трехфазного источника питания и трех одинаковых однофазных нагрузок, подключенных между каждой из фаз и нейтралью (**рис. М10**).

На **рис. М11** показаны примерные формы токов, протекающих в этих фазах, и результирующий ток в нулевом проводнике.

В этом примере ток в нулевом проводнике имеет действующее значение, которое превышает действующее значение тока в фазном проводнике в $\sqrt{3}$ раза. Поэтому нулевой проводник должен иметь увеличенное сечение.

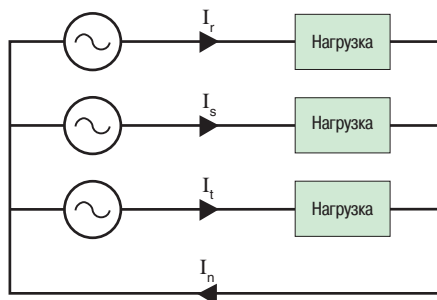


Рис. М10. Протекание токов в фазных и нулевом проводниках трехфазной электросети

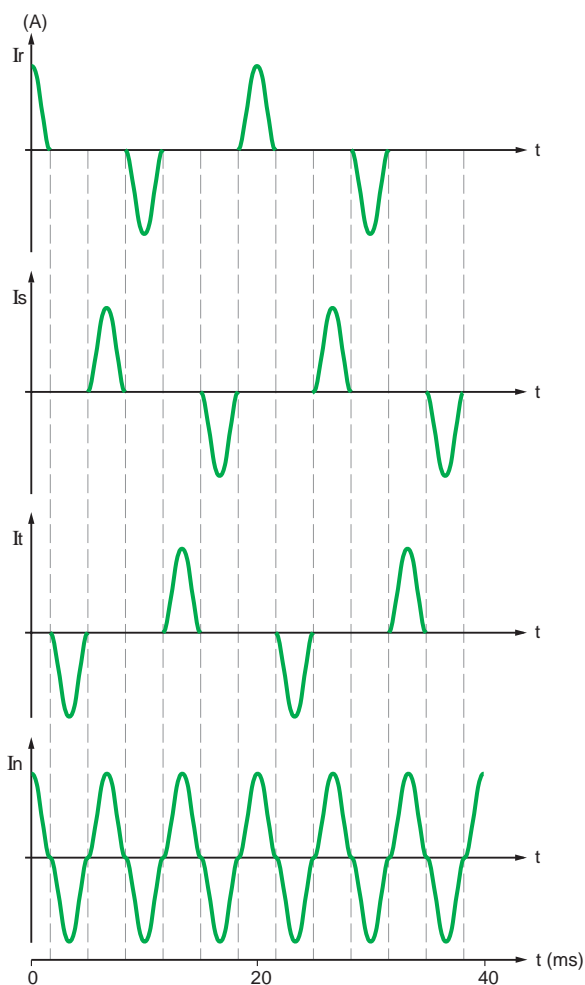


Рис. М11. Примеры токов, протекающих в фазных и нулевом проводниках, в трехфазной электросети (нелинейная нагрузка) ($I_n = I_r + I_s + I_t$)

4.4 Возмущения, влияющие на чувствительные нагрузки

Влияние искажения формы питающего напряжения

Искажение формы питающего напряжения может сказаться на работе чувствительного оборудования:

- устройств регулирования (температуры);
- компьютерного оборудования;
- устройств управления и контроля (защитных реле);

Искажение телефонных сигналов

Гармоники создают помехи в слаботочных цепях. Уровень искажений зависит от длины параллельно идущих силовых и контрольных кабелей, расстояния между этими кабелями и частоты гармоник.

4.5 Экономические последствия

Потери энергии

Гармоники вызывают дополнительные потери энергии в проводниках и оборудовании (эффект Джоуля).

Повышенные затраты на электроэнергию

Наличие токов гармоник может потребовать увеличения потребляемой мощности и, следовательно, более высоких затрат.

Кроме того, энергоснабжающие компании намерены взимать повышенные тарифы с потребителей, которые выдают большое количество гармоник.

Необходимость использования оборудования с повышенными номинальными характеристиками

- Снижение мощности источников питания (генераторов, трансформаторов и источников бесперебойного питания) вследствие наличия гармонических искажений означает необходимость использования устройств с более высокими номинальными характеристиками.
- Сечение проводников должно выбираться с учетом протекания токов гармоник. Кроме того, из-за поверхностного эффекта сопротивление этих проводников возрастает с частотой. Чтобы избежать чрезмерных тепловых потерь, необходимо использовать проводники большего сечения.
- Протекание гармоник в нулевом проводнике означает, что его сечение тоже должно быть увеличено.

Уменьшение срока службы оборудования

Когда уровень искажений питающего напряжения приближается к 10%, срок службы оборудования значительно снижается. Это снижение было оценено на уровне:

- 32,5% для однофазных машин;
- 18% для трехфазных машин;
- 5% для трансформаторов.

Для того чтобы сроки службы оборудования соответствовали номинальной нагрузке, должно использоваться оборудование с завышенными параметрами (номинальная мощность, сечение проводников и т.д.).

Ложное срабатывание автоматических выключателей и отключение электроустановки

Автоматические выключатели, используемые в электроустановке, подвергаются воздействию пиков тока, создаваемых гармониками.

Эти пики токов вызывают их ложное срабатывание, что приводит к производственным потерям и затратам времени на повторный запуск электроустановки.

Примеры

Учитывая экономические последствия для перечисленных ниже электроустановок, оказалось необходимым установить фильтры подавления гармоник.

Вычислительный центр страховой компании

Было подсчитано, что стоимость часа простоя, вызванного ложным срабатыванием автоматического выключателя в этом центре, составляет 100000 евро.

Фармацевтическая лаборатория

Гармоники привели к выходу из строя генераторной установки и прерыванию продолжительных испытаний нового лекарственного средства. Соответствующие убытки были оценены в 17 миллионов евро.

Металлургический завод

Комплекс индукционных печей вызвал перегрузку и разрушение в течение одного года трех трансформаторов мощностью от 1500 до 2500 кВА. Стоимость нарушений производственного процесса была оценена в 20000 евро в час.

Фабрика, производящая садовую мебель

Выход из строя регулируемых приводов приводил к остановкам производства, оцененным в 10000 евро в час.

5 Основные показатели гармонических искажений и принципы их измерения

Для количественного измерения и оценки гармонических искажений форм токов и напряжений используются несколько показателей, в частности:

- коэффициент мощности;
- крест-фактор;
- мощность нелинейных искажений;
- гармонический спектр;
- величины гармонических искажений.

Эти показатели следует использовать при определении любого необходимого корректирующего действия.

5.1 Коэффициент мощности

Определение

Коэффициент мощности (PF) представляет собой соотношение между активной мощностью (P) и полной мощностью (S).

$$PF = \frac{P}{S}$$

Его часто путают с параметром:

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{S_1}$$

где

P₁ - активная мощность тока основной частоты;

S₁ - полная мощность тока основной частоты.

Параметр cos φ относится только к основной сетевой частоте и поэтому отличается от коэффициента мощности PF, который учитывает наличие в электроустановке гармоник.

Интерпретация коэффициента мощности

Первым признаком наличия в электроустановке значительного количества гармоник является то, что замеренный коэффициент мощности PF отличается от замеренной величины cos φ.

5.2 Крест-фактор

Определение

Крест-фактор – это отношение величины амплитуды тока или напряжения (I_m или U_m) к его действующему значению.

- Для синусоидального сигнала пик-фактор равен $\sqrt{2}$.
- Для несинусоидального сигнала пик-фактор может быть или больше или меньше $\sqrt{2}$.

В последнем случае такие значения пик-фактора свидетельствуют об отличии формы кривой напряжения от синусоидальной, т.е. о наличии искажений.

Интерпретация крест-фактора

Для тока, потребляемого нелинейными нагрузками, величина крест-фактора значительно превышает $\sqrt{2}$. Обычно она составляет от 1,5 до 2, но в критических случаях может даже достигать 5. Большая величина крест-фактора свидетельствует о наличии больших гармонических токов, способных вызывать ложные срабатывания защитных устройств.

5.3 Параметры мощности и гармоники

Активная мощность

Активная мощность (P) сигнала, содержащего гармоники, является суммой активных мощностей отдельных гармоник тока и напряжения одного и того же порядка.

Реактивная мощность

Реактивная мощность определяется исключительно для основной частоты, т.е.

$$Q = U_1 \times I_1 \times \sin \varphi_1.$$

Мощность искажений

При наличии гармоник мощность искажений D определяется как $D = (S^2 - P^2 - Q^2)^{1/2}$, где S - полная мощность.

5.4 Гармонический спектр и гармоническое искажение

Принцип

Каждый тип устройства, порождающего гармоники, потребляет ток гармоники определенной формы (определенной амплитуды и фазового сдвига).

Эти параметры, особенно амплитуда каждой гармоники, имеют существенное значение для анализа.

Искажение, вносимое отдельной гармоникой (или гармоническое искажение h-го порядка)

Искажение, вносимое отдельной гармоникой, определяется процентным соотношением амплитуд гармоник h-го порядка и сигнала основной частоты (коэффициент n-й гармоники (см. ГОСТ 13109-97)).

$$u_h(\%) = 100 \frac{U_h}{U_1}$$

или

$$i_h(\%) = 100 \frac{I_h}{I_1}$$

Гармонический спектр

Отображая амплитуду каждой гармоники в функции ее частоты, можно получить график, называемый спектром гармоник.

На **рис. М12** представлен пример спектра гармоник прямоугольного сигнала.

Действующее значение

Действующее значение тока и напряжения может быть рассчитано в функции действующего значения гармоник разных порядков.

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}$$

и

$$U_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} U_h^2}$$

М12

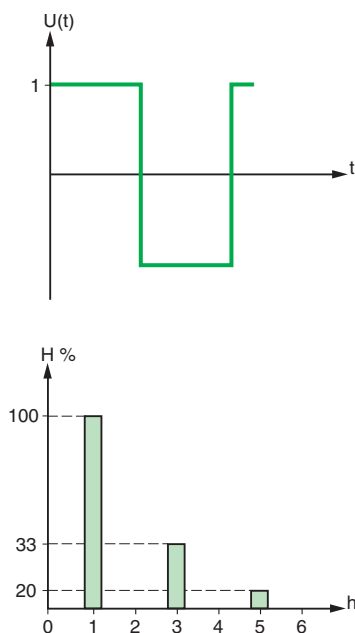


Рис. М12. Спектр гармоник прямоугольного сигнала напряжения $U(t)$

5.5 Суммарный коэффициент гармонических искажений (THD)

Термин «суммарный коэффициент гармонических искажений» THD (коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения (см. ГОСТ 13109-97)) широко применяется при определении уровня содержания гармоник в знакопеременных сигналах.

Определение THD

Для сигнала y коэффициент THD определяется как:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} y_h^2}}{y_1}$$

Это согласуется с определением, приведенным в стандарте МЭК 61000-2-2.

Отметим, что это значение может превышать 1.

Согласно указанному стандарту, параметр h можно ограничить числом 50. Коэффициент THD позволяет одним числом выразить степень искажений, влияющих на ток или напряжение в любом месте электроустановки.

Обычно THD выражается в процентах.

Суммарный коэффициент искажений по току или напряжению

Для гармоник тока эта формула имеет вид:

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1}$$

5 Основные показатели гармонических искажений и принципы их измерения

Ниже представлена эквивалентная формула, которая является более наглядной и удобной в применении, если известно полное действующее значение:

$$\text{THD}_i = \sqrt{\left(\frac{I_{\text{rms}}}{I_1}\right)^2 - 1}$$

Для гармоник напряжения формула имеет вид:

$$\text{THD}_u = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2}}{U_1}$$

Связь между коэффициентом мощности и THD (рис. M13)

Коэффициент THD, отражающий одним значением степень искажения формы тока или напряжения, является важным показателем. Спектр отображает отдельные гармоники, влияющие на искаженный сигнал (коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения (см. ГОСТ 13109-97)).

$$P \approx P_1 = U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1$$

$$\text{Следовательно: } PF = \frac{P}{S} \approx \frac{U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1}{U_1 \cdot I_{\text{rms}}}$$

$$\text{так как: } \frac{I_1}{I_{\text{rms}}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \text{THD}_i^2}}$$

$$\text{отсюда: } PF \approx \frac{\cos \varphi_1}{\sqrt{1 + \text{THD}_i^2}}$$

На рис. M13 представлен график зависимости $\frac{PF}{\cos \varphi}$ от THD_i .

5.6 Использование различных показателей

Показатель THD_u характеризует искажение формы кривой напряжения.

Ниже приведены несколько значений THD_u и соответствующие им явления, происходящие в электроустановке:

- $\text{THD}_u < 5\%$ - нормальная ситуация, отсутствие сбоев в работе оборудования;
- $5\text{--}8\%$ - значительное загрязнение сети гармониками, возможны некоторые сбои в работе;
- $> 8\%$ - большая степень загрязнения сети гармониками, возможны сбои в работе оборудования. Требуется проведение тщательного анализа и установка компенсирующих или фильтрокомпенсирующих (ФКУ) устройств.

Показатель THD_i характеризует искажение формы кривой тока.

Устройство, вносящее гармонические возмущения, обнаруживается посредством замеров THD_i на входах и выходах различных цепей и соответственно отслеживания путей протекания гармоник.

Ниже приведены несколько значений THD_i и соответствующие им явления, происходящие в электроустановке:

- $\text{THD}_i < 10\%$ - нормальная ситуация, отсутствие сбоев в работе оборудования;
- $10\text{--}50\%$ - значительное загрязнение сети гармониками с опасностью повышения температуры и обусловленной этим необходимостью перехода на кабели большего сечения и более мощные источники питания;
- $> 50\%$ - большая степень загрязнения сети гармониками, возможны сбои в работе оборудования. Требуется проведение тщательного анализа и установка компенсирующих или фильтрокомпенсирующих (ФКУ) устройств.

Коэффициент мощности

Используется для того, чтобы оценить: насколько необходимо повысить мощность источника питания рассматриваемой электроустановки.

Крест-фактор

Используется для оценки способности генератора (или источника бесперебойного питания) обеспечивать мгновенные токи большой величины. Например, компьютерное оборудование потребляет ток с сильно искаженной формой волны, для которого крест-фактор может достигать значений 3-5.

Спектр (разложение сигнала на отдельные гармоники)

Дает другое представление электрических сигналов и может использоваться для оценки степени их искажения.

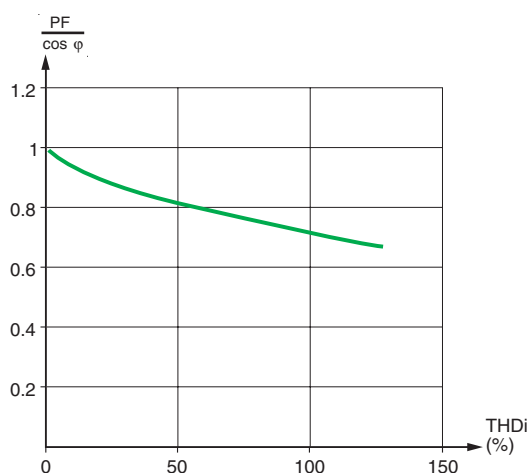


Рис. M13. Изменение $\frac{PF}{\cos \varphi}$ в функции THD_i для случая, когда $\text{THD}_u = 0$

M13

6.1 Устройства, используемые для измерения показателей

Выбор устройств

Традиционные методы контроля и измерений предусматривают использование:

- Осциллографов

Первые признаки искажений сигнала можно получить, просматривая сигналы тока или напряжения на осциллографе.

Отклонение формы волны от синусоидальной отчетливо указывает на наличие гармоник. На осциллограммах тока и напряжения появляются пики.

Заметим, однако, что данный метод не позволяет точно измерить гармонические составляющие.

- Аналоговых спектроанализаторов

Они представляют собой комбинацию полосовых фильтров и вольтметра действующих значений, обеспечивают среднее качество измерений и не могут измерять сдвиг фаз.

Только последние модели цифровых анализаторов позволяют достаточно точно определить значения всех указанных выше показателей.

Функции цифровых анализаторов

Микропроцессоры цифровых анализаторов:

- вычисляют характеристики гармоник (коэффициент мощности, крест-фактор, мощность искажений, THD);

- выполняют различные дополнительные функции (коррекцию, статистическое обнаружение, управление процессом измерений, отображение, обмен данными и др.);

- в многоканальных анализаторах обеспечивают разложение в спектр токов и напряжений в реальном времени.

Работа анализатора и обработка данных

Аналоговые сигналы преобразуются в последовательность числовых значений.

На основе этих данных алгоритм быстрого преобразования Фурье рассчитывает амплитуды и фазы гармоник в большом количестве временных окон.

При расчете THD большинство цифровых анализаторов измеряют гармоники до 20-го или 25-го порядка.

Обработка последовательных значений, рассчитанных с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье (сглаживание, классификация и статистика) может быть проведена самим измерительным устройством или внешним программным обеспечением.

6.2 Процедуры гармонического анализа распределительных сетей

Необходимые измерения проводятся на действующей электроустановке:

- в качестве предупредительной меры с целью получения общего представления о состоянии распределительной сети (составления карты сети);

- в связи с принятием корректирующих мер:

- ☐ для определения причины, источника возмущений и выбора технических решений, необходимых для их устранения;

- ☐ для проверки правильности выбранного решения (после введения изменений в распределительную сеть и проверки снижения доли гармоник).

Режим работы

Ток и напряжение исследуются:

- на источнике питания;

- на шинах главного распределительного щита (или на шинах среднего напряжения);

- в каждой отходящей цепи главного распределительного щита (или на шинах среднего напряжения).

Для измерений необходимо точно знать условия работы электроустановки и в частности состояние батарей конденсаторов (включены, не включены, количество отключенных ступеней).

Цели анализа

- Определить необходимость снижения номинальных параметров установленного оборудования.

- Количественно определить параметры необходимых систем фильтрации и защиты от гармоник, которые должны быть установлены в исследуемой распределительной сети.

- Обеспечить возможность сравнения измеренных и допустимых значений параметров распределительной сети (максимальные значения гармонических искажений, допустимые значения, номинальные значения).

Использование измерительных устройств

Измерительные устройства служат для индикации как мгновенных, так и установившихся параметров гармоник. Для анализа требуются значения параметров длительностью от нескольких секунд до нескольких минут в течение нескольких дней наблюдений.

Требуемые значения параметров включают в себя:

- амплитуды гармоник токов и напряжений;
- содержание каждой гармоники в токе и напряжении;
- суммарный коэффициент искажений (THD) форм тока и напряжения;
- сдвиг фаз между гармониками тока и напряжения для одного и того же порядка и сдвиг фаз гармоник по отношению к базовому сигналу, например, к напряжению основной частоты.

6.3 Тщательный контроль гармоник

Показатели гармоник могут быть измерены:

- с помощью устройств, постоянно установленных в распределительной сети;
- или экспертом, проводившим минимум полдня на площадке, на которой размещена электроустановка (что дает ограниченное представление о состоянии электроустановки).

Стационарные устройства предпочтительней

В силу ряда причин предпочтительнее устанавливать в распределительной сети стационарные измерительные устройства:

- Присутствие эксперта ограничено по времени. Только несколько измерений в разных точках электроустановки и на протяжении достаточно длительного периода (от недели до месяца) позволяют получить общее представление о работе электроустановки и учесть все ситуации, которые могут возникнуть, в частности:
 - колебания напряжения источника питания;
 - изменения в работе электроустановки;
 - добавление нового оборудования к электроустановке.
- Измерительные устройства, установленные в распределительной сети, обеспечивают получение необходимых данных и облегчают проведение диагностики экспертами, сокращая тем самым количество и продолжительность их посещений.
- Стационарные измерительные устройства выявляют любые новые возмущения, возникающие после установки нового оборудования, внедрения новых режимов работы или колебаний параметров питающей сети.

Преимущества использования встроенных устройств измерения и обнаружения

Устройства измерения и обнаружения, встроенные в электрическое распределительное оборудование:

- для общей оценки (предварительного анализа) состояния сети, избавляют от необходимости:
 - брать измерительное оборудование в аренду;
 - вызывать экспертов;
 - присоединять и отсоединять измерительное оборудование.

Для общей оценки состояния сети анализ главных низковольтных распределительных щитов может быть часто выполнен входным устройством и/или измерительными устройствами, установленными в каждой из отходящих цепей.

- для корректирующих мер имеются средства, позволяющие:
 - определить рабочие условия в момент аварийной ситуации;
 - составить карту распределительной сети и оценить внедренное техническое решение.

Использование специального оборудования для решения изучаемой проблемы повышает качество диагностики.

Система PowerLogic (с устройствами Power Meter и Circuit Monitor) и устройство контроля Micrologic обладают всеми необходимыми функциями для обнаружения гармонических искажений.



Рис. M14. Устройство Circuit Monitor

M16



Рис. M15. Устройство контроля Micrologic H с функцией измерения гармоник для силовых автоматических выключателей серии Masterpact NT и NW

Измерения — первый этап в установлении контроля загрязнений питающей сети гармониками. В зависимости от условий эксплуатации каждой электроустановки необходимое решение обеспечивается различными типами измерительного оборудования.

Устройства контроля мощности

Система PowerLogic с устройствами Power Meter и Circuit Monitor

Эти изделия обеспечивают возможность высокоэффективных измерений в распределительных сетях низкого и среднего напряжения. Они представляют собой цифровые устройства, обладающие функциями контроля качества электроэнергии.

PowerLogic — комплексная модульная система, состоящая из Power Meter (PM) и Circuit Monitor (CM). Она позволяет удовлетворить широкий диапазон потребностей — от самых простых (Power Meter) до очень сложных (Circuit Monitor). Эти устройства могут применяться в новых или существующих электроустановках, в которых должен поддерживаться высокий уровень качества электроэнергии. Режим их работы может быть локальным и/или дистанционным.

В зависимости от места установки в распределительной сети, Power Meter обеспечивает начальную индикацию качества электроэнергии. Основные параметры, измеряемые устройством Power Meter:

- суммарный коэффициент гармоник тока и напряжения (THD);
- коэффициент мощности.

Устройство Circuit Monitor (рис. M14) выполняет детальный анализ качества электроэнергии, а также анализирует возмущения в распределительной сети. Основными функциями этого устройства являются следующие:

- измерения более 100 электрических параметров;
- хранение в памяти и привязка меток времени к минимальным и максимальным значениям каждого электрического параметра;
- функции сигнализации, инициируемые значениями электрических параметров;
- регистрация данных о событиях;
- регистрация отклонений параметров тока и напряжения;
- анализ гармоник;
- регистрация формы сигнала (контроль отклонений).

Micrologic — устройство контроля качества электроэнергии, встроенное в автоматический выключатель

В новых электроустановках устройство контроля Micrologic H (рис. M15), являющееся составной частью силовых автоматических выключателей серии Masterpact, особенно полезно для измерений на вводах электроустановок или на больших отходящих линиях.

Устройство контроля Micrologic H обеспечивает точный анализ качества электроэнергии и детальную диагностику происшествий в сети и предназначено для работы совместно с монитором распределительного щита или контроллером. Оно может:

- измерять ток, напряжение, активную и реактивную мощность;
- измерять суммарный коэффициент искажений тока и напряжения (THD);
- отображать амплитуду и фазу гармоник тока и напряжения до 51-й гармоники включительно;
- регистрировать форму волны сигнала (контроль отклонений).

Функции, выполняемые устройством контроля Micrologic H, эквивалентны тем, которые выполняются устройством Circuit Monitor.

Работа устройств контроля качества электроэнергии

Программное обеспечение для дистанционной работы и анализа

В более общей структуре распределительной сети с функциями контроля, имеется возможность объединения различных контрольно-измерительных устройств с помощью сети передачи данных, что позволяет централизовать сбор данных и получить общее представление о возмущениях во всей распределительной электрической сети.

Затем, в зависимости от применения, оператор может провести измерения в реальном времени, рассчитать необходимые значения, провести запись форм сигналов, предусмотреть подачу предупредительных сигналов и др.

Устройства контроля качества электроэнергии передают имеющиеся данные по сетям Modbus, Digipact или Ethernet.

Важная цель этой системы — способствовать выявлению и планированию работ по техническому обслуживанию и ремонту. Она позволяет существенно сократить продолжительность обслуживания и стоимость временно установленных устройств для проведения измерений на электроустановке или выбора параметров оборудования (фильтров).

Программное обеспечение SMS

Программное обеспечение SMS — комплексное программное обеспечение, используемое для анализа распределительных сетей совместно с устройствами, входящими в систему PowerLogic. Оно устанавливается на персональном компьютере и может:

- отображать результаты измерений в реальном времени;
- отображать «исторические» диаграммы за определенный период;
- выбирать способ представления данных (таблицы, различные графики);
- проводить статистическую обработку данных (отображать гистограммы).

8 Способы ослабления гармоник

Существует три различных способа ослабления гармоник:

- модификация электроустановки;
- применение специальных устройств в системе электропитания;
- фильтрация.

8.1 Основные рекомендации

Чтобы ограничить распространение гармоник в распределительной сети, существуют различные решения, которые должны учитываться особенно при проектировании новой электроустановки.

Размещайте нелинейные нагрузки ближе к источнику питания

Гармонические искажения напряжения увеличиваются с уменьшением мощности короткого замыкания. Не учитывая всех экономических соображений, предпочтительно подсоединять нелинейные нагрузки как можно ближе к источнику питания (рис. M16).

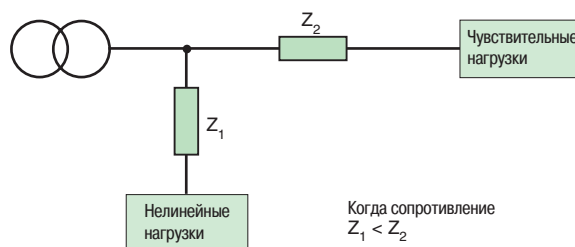


Рис. M16. Нелинейные нагрузки, подключенные как можно ближе к источнику питания (рекомендуемая схема)

Группируйте нелинейные нагрузки

При разработке однолинейной схемы нелинейные устройства должны быть отделены от других (рис. M17). Эти две группы устройств должны питаться от отдельных систем шин.

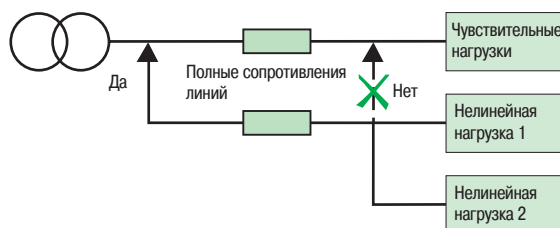


Рис. M17. Объединение в группу нелинейных нагрузок и их подсоединение как можно ближе к источнику питания (рекомендуемая схема)

Используйте отдельные источники питания

Для ограничения содержания гармоник в сети можно также использовать источник питания с отдельным трансформатором (рис. M18).

Недостаток этого способа заключается в повышении стоимости электроустановки.

M17

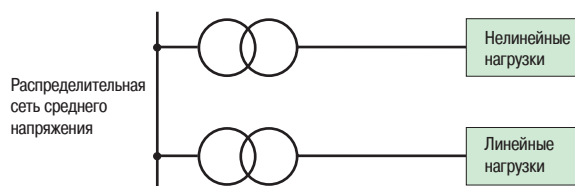


Рис. М18. Питание нелинейных нагрузок от отдельного трансформатора

Трансформаторы со специальными соединениями обмоток

Различные соединения обмоток трансформатора позволяют устранить определенные гармоники, например:

- применение трехфазного трансформатора с двумя вторичными обмотками, одна из которых соединена в звезду, а другая в треугольник позволяет уменьшить пятую и седьмую гармоники в первичной обмотке (рис. М19);
- соединение типа треугольник-звезда подавляет третью гармонику.

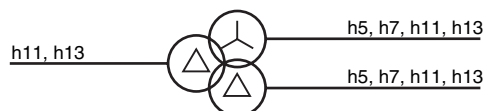


Рис. М19. Трансформатор с двумя вторичными обмотками подавляет распространение пятой и седьмой гармоник вверх по сети

Устанавливайте линейные реакторы

При питании регулируемых приводов установка линейных реакторов позволяет сгладить форму тока. Увеличение полного сопротивления питающей сети ограничивает содержание гармоник тока.

Установка на батареях конденсаторов реакторов для подавления гармоник увеличивает полное сопротивление комбинации реактор-конденсатор для высших гармоник.

Это устраняет резонанс и защищает конденсаторы.

Выбирайте подходящую систему заземления установки

Система TN-C

В системе TN-C по проводнику PEN протекают токи, вызванные неравномерной нагрузкой по фазам.

В установившемся режиме по проводнику PEN протекают токи гармоник. Поскольку он имеет определенное сопротивление, то незначительные изменения потенциала (несколько вольт) между устройствами могут привести к сбоям в работе электронного оборудования.

Поэтому система TN-C должна использоваться только для питания силовых цепей в головной части сети и не должна применяться для питания «чувствительных» ЭП.

Система TN-S

Данную систему рекомендуется применять при наличии в питающей сети гармоник. Нулевой проводник и защитный проводник (РЕ) полностью отделены друг от друга, и поэтому распределение потенциалов по сети является более равномерным.

8.2 Фильтрация гармоник

В случаях, когда описанные выше превентивные меры оказываются недостаточными, необходимо оборудовать электроустановку системами фильтрации.

Существуют три типа фильтров:

- пассивные;
- активные;
- гибридные.

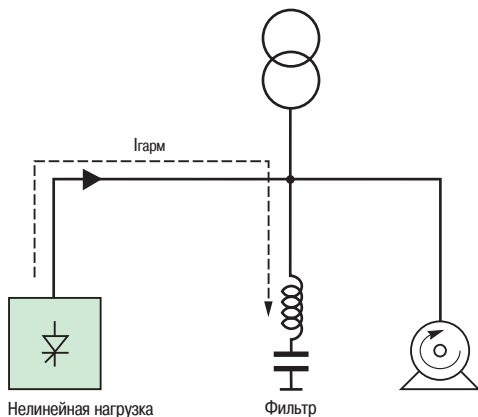


Рис. M20. Принцип действия пассивного фильтра

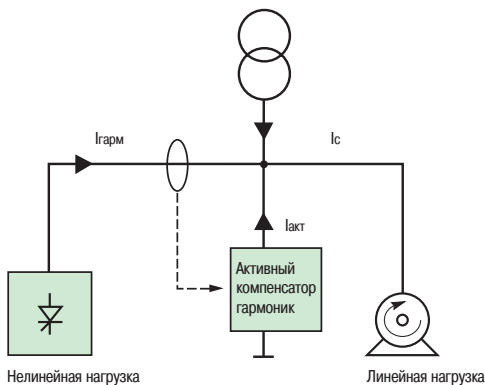


Рис. M21. Принцип действия активного фильтра

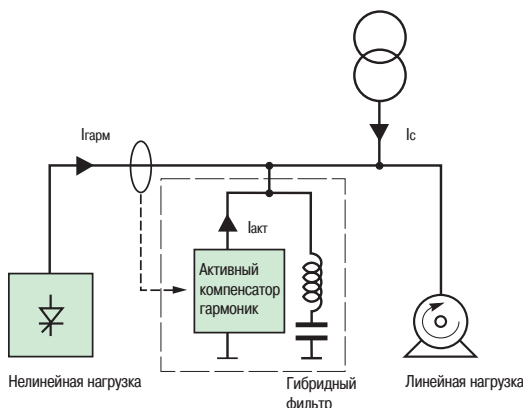


Рис. M22. Принцип действия гибридного фильтра

Пассивные фильтры

Типовые применения

- промышленные электроустановки с комплектом нелинейных нагрузок мощностью более 200 кВА (регулируемые приводы, источники бесперебойного питания, выпрямители и др.);
- электроустановки, в которых необходима компенсация реактивной мощности;
- электроустановки, в которых нужно снизить искажения напряжения с тем, чтобы не создавать возмущений для чувствительных нагрузок;
- электроустановки, в которых нужно снизить искажения тока с тем, чтобы избежать перегрузок.

Принцип действия

Параллельно нелинейной нагрузке устанавливается LC-контур, настроенный на частоту гармоники, которую необходимо подавить (рис. M20). Этот контур поглощает гармоники, предотвращая их попадание в распределительную сеть.

Обычно пассивный фильтр настраивается на частоту, близкую к частоте гармоники, которую необходимо подавить. Если требуется подавление нескольких гармоник, могут использоваться несколько параллельно соединенных фильтров.

Активные фильтры (активные компенсаторы гармоник)

Типовые применения

- коммерческие электроустановки с комплектом нелинейных нагрузок мощностью менее 200 кВА (регулируемые приводы, источники бесперебойного питания, офисное оборудование и др.);
- электроустановки, в которых нужно снизить искажения тока с тем, чтобы избежать перегрузок.

Принцип действия

Эти системы силовой электроники устанавливаются последовательно или параллельно нелинейной нагрузке и компенсируют гармоники тока или напряжения, потребляемые этой нагрузкой.

На рис. M21 показан параллельно включенный активный компенсатор гармоник, компенсирующий гармонику тока ($I_{\text{гarm}} = -I_{\text{акт}}$).

Активный компенсатор гармоник генерирует в распределительную сеть гармоники, потребляемые соответствующей нелинейной нагрузкой, но с противоположной фазой. В результате этого ток в сети I_c остается синусоидальным.

Гибридные фильтры

Типовые применения

- промышленные электроустановки с комплектом нелинейных нагрузок мощностью более 200 кВА (регулируемые приводы, источники бесперебойного питания, офисное оборудование и др.);
- электроустановки, требующие компенсации реактивной мощности;
- электроустановки, в которых необходимо снизить искажения напряжения с тем, чтобы не создавать возмущений для чувствительных ЭП;
- электроустановки, в которых необходимо снизить искажения тока с тем, чтобы избежать перегрузок;
- электроустановки, в которых должны соблюдаться жесткие ограничения на «выброс» гармоник в сеть.

Принцип действия

Гибридный фильтр состоит из комбинации пассивных и активных фильтров (рис. M22). Он обладает преимуществами обоих типов фильтров и пригоден для применения в широком диапазоне мощностей и режимов работы электроустановки.

Критерии выбора

Пассивный фильтр

Обеспечивает компенсацию реактивной мощности и эффективную фильтрацию гармоник тока. Такие фильтры также снижают уровень гармоник напряжения в электроустановках, в которых форма напряжения питания отличается от синусоидальной. Если генерируемая фильтром реактивная мощность велика, то рекомендуется отключать установленный пассивный фильтр в те периоды времени, когда коэффициент загрузки установки является низким. Предварительные исследования возможности применения фильтра должны учитывать возможное наличие батареи конденсаторов для компенсации коэффициента мощности, которую, возможно, придется удалить.

Активные компенсаторы гармоник

Обеспечивают подавление гармоник в широком диапазоне частот и могут работать с любым типом нагрузки.

С другой стороны, мощности данных устройств являются низкими.

Гибридные фильтры

Объединяют в себе преимущества активных и пассивных фильтров.

Для устранения гармоник может быть предложен полный набор услуг:

- анализ схемы электроустановки;
- системы измерения и контроля;
- устройства фильтрации.

8.3 Метод

Наилучшее решение с учетом технических и экономических факторов основывается на результатах тщательного анализа.

Аудит систем энергоснабжения среднего и низкого напряжения на наличие гармоник

Если Вы воспользуетесь услугами эксперта, Вам гарантируется, что предложенное им решение даст эффективные результаты (т.е. достоверное значение максимального суммарного коэффициента гармонических искажений THDu).

Аудит распределительной электросети проводится инженером-специалистом, имеющим необходимую аппаратуру и программное обеспечение для анализа и моделирования.

Аудит включает в себя следующие этапы:

- измерение искажений кривых тока, линейного и фазного напряжения, возникающих из-за наличия в сети нелинейных нагрузок;
- компьютерное моделирование явлений в сети для выяснения причин и выбора наилучшего решения;
- полный отчет о результатах аудита, отражающий:
 - текущие уровни возмущений;
 - максимально допустимые уровни возмущений (в соответствии с МЭК 61000, МЭК 34 и др.);
- предложение, содержащее решения с гарантированными уровнями функционирования электроустановки;
- реализацию выбранного решения с использованием необходимых средств и ресурсов.

Весь процесс аудита описан в международном стандарте ISO 9002.

8.4 Модели фильтров

Пассивные фильтры

Пассивные фильтры состоят из индуктивно-емкостных LC-контуров, настроенных на конкретную частоту гармоник, которую необходимо подавить.

Для устранения ряда гармоник система может состоять из нескольких фильтров. Для трехфазных напряжений 400 В максимальные допустимые мощности могут достигать:

- 265 кВА/470 А для 5-й гармоник;
- 145 кВА/225 А для 7-й гармоник;
- 105 кВА/145 А для 11-й гармоник.

Пассивные фильтры могут быть созданы для всех уровней напряжений и токов.

Активные фильтры

- Активные компенсаторы гармоник SineWave:
 - пригодны для трехфазных напряжений 400 В, могут быть изготовлены на токи от 20 до 120 А;
 - компенсируют все гармоники от 2-ой до 25-ой. Компенсация может быть полной или касаться определенных гармоник;
 - ослабление уровня искажений: при номинальной мощности отношение THDi на нагрузке к THDi на вышерасположенном участке сети превышает 10;
 - выполняемые функции: коррекция коэффициента мощности, компенсация гармоник нулевой последовательности, система диагностики и технического обслуживания, параллельное подключение, дистанционное управление, интерфейс связи Ibus/RS485.
- Активные фильтры Accusine:
 - пригодны для трехфазных напряжений 400 и 480 В, могут быть изготовлены на токи от 30 до 50 А;
 - фильтруют все гармоники вплоть до 50-й;
 - выполняемые функции: коррекция коэффициента мощности, параллельное подключение, мгновенная реакция на изменения нагрузки.

Гибридные фильтры

Эти фильтры объединяют в себе преимущества пассивного фильтра и активного компенсатора гармоник SineWave.