

Компания Schneider Electric приступила к выпуску «Технической коллекции Schneider Electric» на русском языке.

***Техническая коллекция** представляет собой серию отдельных выпусков для специалистов, которые хотели бы получить более подробную техническую информацию о продукции Schneider Electric и ее применении, в дополнение к тому, что содержится в каталогах.*

*В **Технической коллекции** будут публиковаться материалы, которые позволят лучше понять технические и экономические проблемы и явления, возникающие при использовании электрооборудования и средств автоматизации Schneider Electric.*

***Техническая коллекция** предназначена для инженеров и специалистов, работающих в электротехнической промышленности и в проектных организациях, занимающихся разработкой, монтажом и эксплуатацией электроустановок, распределительных электрических сетей, средств и систем автоматизации.*

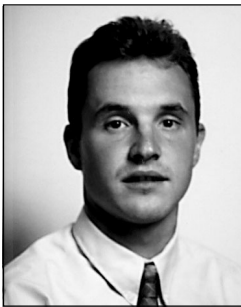
***Техническая коллекция** будет также полезна студентам и преподавателям ВУЗов. В ней они найдут сведения о новых технологиях и современных тенденциях в мире Электричества и Автоматики.*

*В каждом выпуске **Технической коллекции** будет углубленно рассматриваться конкретная тема из области электрических сетей, релейной защиты и управления, промышленного контроля и автоматизации технологических процессов.*

Валерий Саженов,
Технический директор
ЗАО «Шнейдер Электрик»,
Кандидат технических наук

Выпуск № 22

Гармонические искажения в электрических сетях и их снижение



Кристиан Колломбет

В 1994 г. Закончил политехнический институт в Гренобле. В сотрудничестве с Шнейдер Электрик занимался научными исследованиями по теме расчетов токов короткого замыкания в промышленных электросетях. С 1995 г. он работает в научно-технической дирекции, где занимается изучением режимов функционирования электрических сетей и их влиянием на оборудование и материалы.



Жан Марк Люпен

В 1984 г. получил диплом инженера Высшей Национальной Электротехнической Школы Гренобля. С 1985 г. в службе Rectiphase, он активно работал над конденсаторами высокого напряжения, затем над созданием конденсаторных батарей и фильтров высших гармоник. В настоящее время он занимает пост технического эксперта в службе компенсации реактивной мощности и фильтрации гармоник и отвечает за испытания, нормирование и прогнозирование.



Жак Шонек

Инженер, выпускник Высшей Национальной Школы электротехники, электроники, информатики, гидравлики и телекоммуникаций и доктор технических наук университета Тулузы, он участвовал с 1980 по 1995 в проектировании регуляторов скорости «Telemesapique». Затем он заведовал отделом фильтрации гармоник. В настоящее время отвечает за приложения и электротехнические сети внутри проектного отдела силовых электрических сетей.

В переиздании 1999 г. также участвовали: Ноэль Килльон, работает в настоящее время в департаменте «Защита и контроль сетей» и Бруно Люссон, специалист в области высших гармоник во французском отделении технической поддержки.

Перевод выполнен доцентом Самарского Государственного Технического Университета Лыковым Юрием Федоровичем

Терминология

Символы

BP – полоса пропускания резонансного фильтра
C – емкость конденсатора, общее обозначение конденсатора
KU – коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения
 δ – угол диэлектрических потерь
 f_1 – основная частота
 f_{ar} – частота антирезонанса
 f_n – частота n-й гармонической составляющей
 f_r – резонансная частота
 φ_n – начальная фаза гармоники n
 I_n – действующее значение тока гармоники номер n
j – комплексный оператор: $j^2 = -1$
L – индуктивность
Lcc – индуктивность короткого замыкания (КЗ) сети относительно определенной точки
n – номер гармонической составляющей
 n_{ar} – номер антирезонансной гармоники (отношение антирезонансной частоты к основной частоте)
 n_r – номер резонансной гармоники (отношение резонансной к основной частоте)
k – положительное целое число
p – кратность пульсаций выпрямленного напряжения
 p_1 – потери в фильтре от тока основной гармоники
 p_n – потери в фильтре от тока n-й гармоники
P(Вт) – активная мощность
q – добротность реактора
Q – добротность фильтра
Q(вар) – реактивная мощность
r – активное сопротивление
R – активное сопротивление (действительная часть полного сопротивления)
Спектр – совокупность гармоник с указанием амплитуд относительно основной гармоники
Scc – мощность КЗ в определенной точке сети
T – период переменного тока
U – действующее значение линейного напряжения
 V_n – действующее значение фазного напряжения гармоники номер n
X – реактивное сопротивление
 X_o – характеристическое сопротивление фильтра
 X_{cc} – реактивное сопротивление КЗ сети относительно определенной точки
 Y_o – амплитуда постоянной составляющей
 Y_n – действующее значение гармонической составляющей номер n
Z – полное сопротивление

Аббревиатуры

МЭК (IEC) – Международная электротехническая комиссия
АЧХ – амплитудно-частотная характеристика
ВАХ – вольт-амперная характеристика
ИГ – источник гармоник
КБ – конденсаторная батарея
КЗ – короткое замыкание
ФКУ – фильтрокомпенсирующее устройство
ЭП – электроприемник

Гармонические искажения в электрических сетях и их снижение

Трёхфазные цепи наиболее распространены в современной электроэнергетике. При этом напряжения и токи образуют трёхфазную синусоидальную систему. Одним из параметров этой системы является форма кривой, которая должна быть максимально приближена к синусоиде.

Необходимость коррекции формы кривой возникает в тех случаях, когда искажение формы превышает определённые пределы. Последнее часто имеет место в электрических сетях, где имеются электроприёмники (ЭП), являющиеся источниками высших гармоник (например, дуговые печи, статические силовые преобразователи, некоторые типы ламп и т.п.).

В данном документе приведены сведения о проблемах, создаваемых высшими гармониками, причинах их возникновения и наиболее распространённых решениях.

Содержание

1	Гармонические величины	4
2	Основные помехи, вызываемые гармоническими токами и напряжениями	6
	2.1 Мгновенные воздействия	6
	2.2 Длительные воздействия	6
3	Допустимые пределы, рекомендации, нормы	8
	3.1 Приближенные величины	8
	3.2 Нормативные пределы	8
4	Источники гармоник или загрязнители	9
	4.1 Статические преобразователи в трёхфазной сети	10
	4.2 Освещение	11
	4.3 Электродуговые печи	11
	4.4 Индуктивности с сердечниками	12
	4.5 Вращающиеся машины	12
	4.6 Модель, используемая в расчетах	12
	4.7 Выполнение расчетов	12
5	Сеть с ИГ и конденсаторами, проблема усиления гармоник при резонансе	13
	5.1 В отсутствие конденсаторных батарей	14
	5.2 В присутствии конденсаторной батареи	14
6	Защитный реактор	17
7	Фильтры	18
	7.1 Резонансный шунт	19
	7.2 Демпфированные (широкополосные) фильтры	21
	7.3 Активные фильтры	21
8	Пример расчета и анализа упрощенной сети	22
	8.1 Подключение одной конденсаторной батареи (КБ)	23
	8.2 Подключение КБ, защищенной реактором	24
	8.3 Подключение шунтового резонансного фильтра 5-й гармоники и демпфированного фильтра 7-й гармоники	24
9	Заключение	25
	Библиография	26

1 Гармонические величины

Приведем определения, знание которых необходимо, чтобы понять изложенное в данном выпуске Технической коллекции.

Читатели, уже знакомые с этим материалом, могут перейти к следующей главе.

Изменение во времени тока и напряжения в промышленных сетях переменного тока значительно отличается от чистой синусоиды (см. **рис. 1**). Эта переменная величина в действительности состоит из определенного количества синусоид разных частот, среди которых имеется синусоида промышленной частоты, называемая «основная синусоида» или просто «основная».

«Гармоническая величина» или просто «гармоника»

Это одна из синусоидальных составляющих физической переменной величины, имеющая частоту, кратную частоте основной составляющей. Амплитуда высшей гармоники составляет обычно несколько процентов от амплитуды основной.

Порядок гармоники

Это отношение частоты гармоники n к частоте основной гармоники (обычно к промышленной частоте 50 или 60 Гц):

$$n = \frac{f_n}{f_1}$$

Поэтому основная гармоника имеет порядок 1.

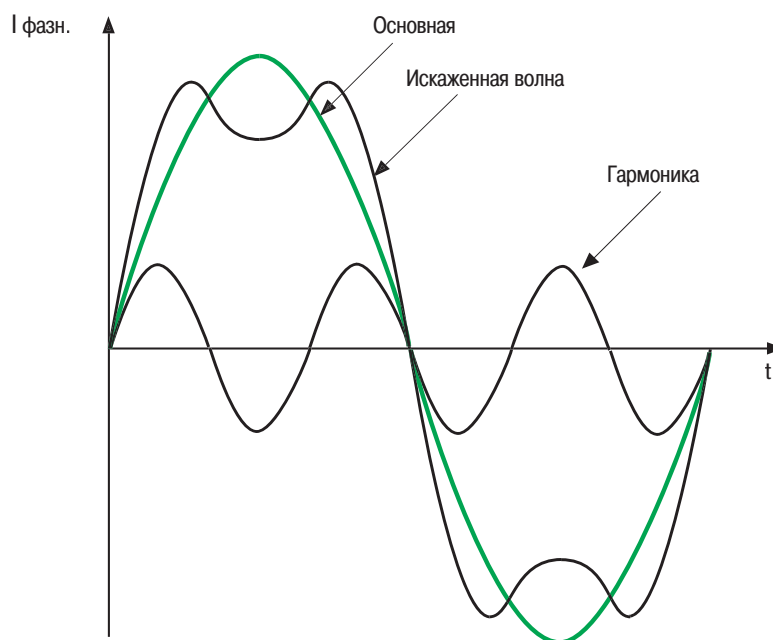


Рис. 1. Картина искаженной волны

Спектр

Это гистограмма, изображающая зависимость амплитуды каждой гармоники от ее порядка (см. рис. 2).

Выражение для периодической несинусоидальной величины

Ряд Фурье для любой периодической величины имеет вид:

$$y(t) = Y_0 + \sum_{n=1}^{n=\infty} Y_n \sqrt{2} \sin(n\omega t - \varphi_n)$$

где:

- Y_0 – постоянная составляющая, обычно отсутствует в установившемся режиме электрической распределительной сети,
- Y_n – действующее значение гармоники порядка n ,
- φ_n – начальная фаза гармонической составляющей.

Обычно амплитуды высших гармоник снижаются с увеличением номера. В соответствии с нормами учитывают гармоники не выше 40-й.

Действующее значение несинусоидальной величины

Действующее значение несинусоидальной величины определяет нагрев. Для синусоидальной величины действующее значение меньше амплитудного в корень из 2-х раз.

Для несинусоидальной величины в установившемся режиме общее количество тепла равно сумме нагревов, вызванных каждой из гармонических составляющих, то есть:

$$RI^2 t = RI_1^2 t + RI_2^2 t + \dots + RI_n^2 t$$

$$\text{откуда: } I^2 = I_1^2 + \dots + I_n^2$$

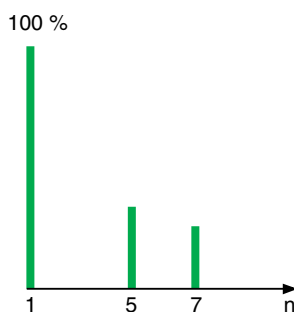


Рис. 2. Амплитуды высших гармоник обычно даются относительно основной

$$\text{или: } I = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=\infty} I_n^2}$$

полагая при этом, что сопротивление постоянно. Измерение действующего значения несинусоидальной величины осуществляется либо напрямую приборами, показывающими действующее (тепловое) значение или с помощью анализаторов спектра.

Коэффициент n -ой гармонической и коэффициент искажения кривой

Эти два коэффициента характеризуют степень «загрязнения» сети.

■ «Коэффициент n -й гармонической»

Он показывает уровень каждой гармоники по отношению к основной. Это есть отношение действующих значений n -й и основной гармоник.

Пример: коэффициент n -й гармонической тока: $KI(n) = 100 \cdot I_n / I_1$, где I_n, I_1 – действующие значения токов n -й и основной гармоник.

■ Коэффициент искажения синусоидальности кривой D

Он показывает относительный уровень теплового воздействия совокупности высших гармоник; это отношение действующего значения высших гармоник

либо к действующему значению основной гармоники (МЭК 61000-2-2), когда $D > 0$ может быть весьма большим:

$$D = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} Y_n^2}}{Y_1}$$

либо (реже) к измеренному действующему значению несинусоидальной величины, $0 < D < 1$:

$$D = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} Y_n^2}}{\sqrt{\sum_{n=1}^{n=\infty} Y_n^2}}$$

Если нет уточнений, то будем использовать определение по МЭК 61000-2-2, которое дает отношение между током высших гармоник и неискаженным током первой гармоники.

2 Основные помехи, вызываемые гармоническими токами и напряжениями

Токи и напряжения высших гармоник, наложенные на основную гармонику, совместно воздействуют на приборы и оборудование. В зависимости от типов имеющихся ЭП,

эти токи и напряжения оказывают различные воздействия:

- либо мгновенные воздействия,
- либо длительные воздействия.

2.1 Мгновенные воздействия

Напряжения гармоник могут нарушить работу устройств управления электронных приборов. Они могут влиять на условия коммутации тиристоров, смещая прохождение напряжения через ноль (см. МЭК 60146-2 и техническую тетрадь Шнейдер Электрик № 141).

Индукционные счетчики электроэнергии в присутствии высших гармоник дают дополнительную погрешность: например счетчик, имеющий класс точности 2 дает дополнительную погрешность 0,3%, если коэффициенты пятой гармонической составляющей тока и напряжения составляют 5%.

Применяемые электроснабжающими компаниями приемники централизованных телекоманд, использующие звуковые частоты, могут неправильно работать, если частоты присутствующих гармоник также близки к звуковым. Ниже будут рассмотрены и другие причины нарушения работы этих приемников, связанные с сопротивлением сети на высших гармониках.

Вибрации, шум

Мгновенные значения протекающих токов гармоник вызывают пропорциональные им электродинамические усилия, которые приводят к возникновению вибраций и акустических шумов, особенно в электромагнитных аппаратах (трансформаторы, реакторы).

Пульсирующие механические моменты, вызванные гармоническими вращающимися магнитными полями, приводят к вибрациям во вращающихся электрических машинах.

Помехи, наведенные в слаботочных цепях (телефон, котроль-управление)

Эти помехи появляются, когда слаботочная линия проложена вдоль силовой распределительной линии с искаженными по форме токами и напряжениями.

В расчет следует принимать такие параметры, как: длина параллельного участка, расстояние между двумя цепями, частоты гармоник (наведенный сигнал возрастает с увеличением частоты).

2.2 Длительные воздействия

К длительным воздействиям относятся нагрев и механическая усталость материалов, связанная с вибрацией.

Нагрев конденсаторов

Потери, вызывающие нагрев, возникают по двум причинам: проводимость и гистерезис диэлектрика.

В первом приближении они пропорциональны квадрату действующего значения тока. Конденсаторы чувствительны к перегрузкам, вызванным либо слишком высоким напряжением основной гармоники, либо присутствием напряжений высших гармоник.

Эти потери определяются с помощью угла диэлектрических потерь δ конденсатора, тангенс которого равен отношению потерь активной мощности к вырабатываемой реактивной мощности (см. рис.3). На основной частоте величина $\tan \delta$ составляет примерно 10^{-4} .

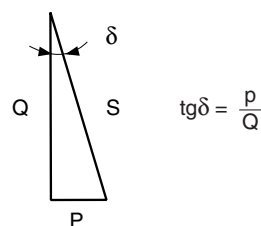


Рис. 3. Треугольник мощностей P , Q , S конденсатора

Этот нагрев может вызвать пробой конденсатора.

Нагрев, вызванный дополнительными потерями в машинах и трансформаторах

■ дополнительные потери во вращающихся машинах возникают на статоре (в обмотке и железе) и особенно в роторе (в короткозамкнутой обмотке, в успокоительной обмотке, в железе) вследствие значительной разницы между скоростями гармонических вращающихся полей и ротора. Заметим, что измерения на роторе (температуры, наведенных токов) весьма трудны или невозможны,

■ дополнительные потери в обмотках трансформаторов объясняются поверхностным эффектом (вытеснение тока высокой частоты к поверхности и увеличение сопротивления проводника) и в железе – гистерезисом и вихревыми токами.

Нагрев кабелей и оборудования

Потери активной мощности в кабелях, по которым протекают токи высших гармоник, увеличиваются, что ведет к увеличению температуры. Среди причин дополнительных потерь можно назвать:

- повышение действующего значения тока при неизменной потребляемой активной мощности;
- увеличение активного сопротивления проводников на повышенных частотах из-за поверхностного эффекта;
- увеличение диэлектрических потерь в изоляции на повышенных частотах (если искажение формы кривой напряжения значительно);
- последствия эффекта близости оболочек и экранов, заземленных с двух концов и т.п.

Расчеты длительных режимов выполняются в соответствии со стандартом МЭК 60287.

В общем случае любое оборудование (распределительные устройства), подверженное воздействию гармонических токов и напряжений, имеет повышенные потери и должно быть выбрано с запасом. Например, ячейка отходящей линии к конденсаторной батарее должна выбираться на ток в 1,3 раза превышающий её реактивный компенсирующий ток. Такое увеличение расчетного тока не учитывает, тем не менее, увеличение нагрева из-за поверхностного эффекта в проводниках.

Измерение коэффициентов гармонических составляющих токов и напряжений производится при помощи анализаторов спектра, который дает амплитуду каждой составляющей.

При этом важно выбрать датчики тока и напряжения, имеющие полосу пропускания соответствующую полосе измеряемых частот.

Действующее значение искаженных токов и напряжений может быть:

- либо измерено прибором, дающим правильное действующее значение,
- либо восстановлено из спектра, полученного с помощью анализатора,
- либо оценено по кривой, полученной с помощью осциллографа.

3 Допустимые пределы, рекомендации, нормы

3.1 Приближенные величины

- синхронные машины: допустимый коэффициент искажения синусоидальности кривой тока статора = 1,3-1,4%;
- асинхронные машины: допустимый коэффициент искажения синусоидальности кривой тока статора = 1,5-3,5%;
- кабели: допустимы коэффициент искажения кривой напряжения жила-экран = 10%;
- силовые конденсаторы: коэффициент искажения кривой тока = 83%, что приводит к перегрузке 30% (1,3?I_N), перегрузка по напряжению может достигать 10%;
- чувствительная электроника: коэффициент искажения кривой напряжения 5%, коэффициент n-й гармонической 3% в зависимости от вида установки.

3.2 Нормативные пределы

Группа стандартов, посвященных электромагнитной совместимости (МЭК 61000) дает пределы, касающиеся гармоник, и в частности:

- МЭК 61000-3-2 устанавливает пределы выдачи в сеть токов гармоник электроприемниками, потребляющими менее 16 А на фазу (за исключением определенной категории ЭП – см. стандарт). ЭП, потребляющие более 16 А рассматриваются в техническом циркуляре МЭК 61000-3-4 и должны быть приведены в подготавливаемом стандарте МЭК 61000-3-12.
- МЭК 61000-2-2 устанавливает нормально допустимые уровни гармоник напряжения в сетях низкого напряжения общего назначения (см. [рис. 4](#)).

- МЭК 61000-2-4 устанавливает нормально допустимые уровни гармоник в промышленных сетях. Следует заметить, что нормально допустимый уровень может быть превзойден с небольшой вероятностью.

С другой стороны, норма EN 50160 касается характеристик напряжения, поставляемого распределительными сетями общего пользования. Во Франции компания EDF («Электричество Франции») предлагает промышленным клиентам контракт, называемый «Energie» (изумруд), в соответствии с которым стороны берут на себя взаимные обязательства: качество энергии со стороны EDF и ограниченная генерация гармоник со стороны клиента.

Нечетные гармоники, не кратные 3-м		Гармоники, кратные 3-м		Четные гармоники	
Номер гармоники n	Напряжение гармоники %	Номер гармоники n	Напряжение гармоники %	Номер гармоники n	Напряжение гармоники %
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,3	6	0,5
13	3	21	0,2	8	0,5
17	2	>21	0,2	10	0,5
19	1,5			12	0,2
23	1,5			>12	0,2
25	1,5				
>25	0,2+0,5x25/n				

Рис. 4. Нормально допустимые значения n-ой гармонической составляющей в сетях низкого напряжения общего назначения (МЭК 61000-2-2)

4 Источники гармоник или загрязнители

В промышленности ими являются:

- статические преобразователи,
- дуговые печи,
- освещение,

- катушки с сердечниками,
- другие, такие как зубцовые гармоники вращающихся машин, небольшие по величине.

4.1 Статические преобразователи в трехфазной сети

Выпрямительные мосты и другие статические преобразователи на диодах и тиристорах являются генераторами токов высших гармоник. Так в трехфазной мостовой схеме идеально выпрямленный ток вызывает потребление несинусоидального тока из сети.

Значительная индуктивность цепи постоянного тока (см. **рис. 5**) вызывает прямоугольную форму тока, а включение значительной емкости, как это часто встречается на практике, приводит к появлению пиков тока (см. **рис. 6**).

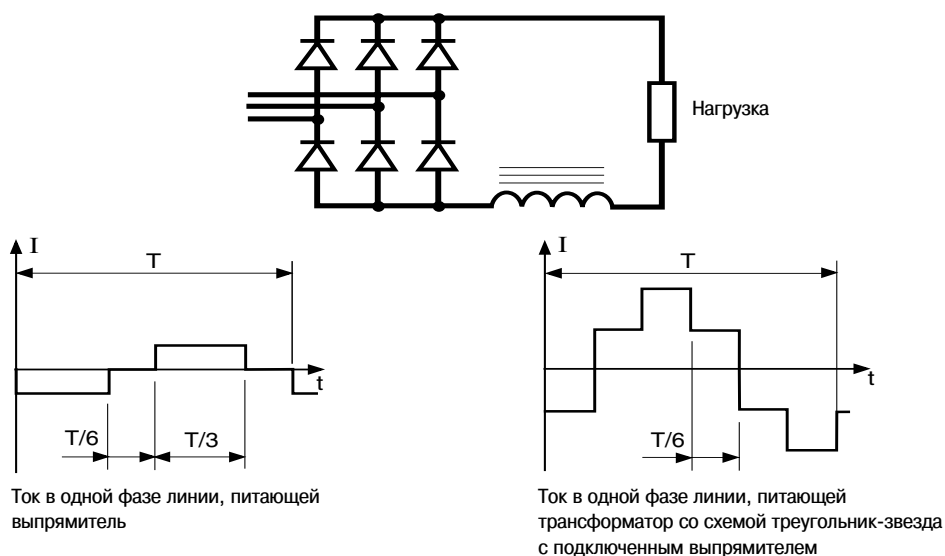


Рис. 5. Ток, потребляемый из сети трехфазным выпрямительным мостом, работающим на индуктивную нагрузку, при идеальном сглаживании

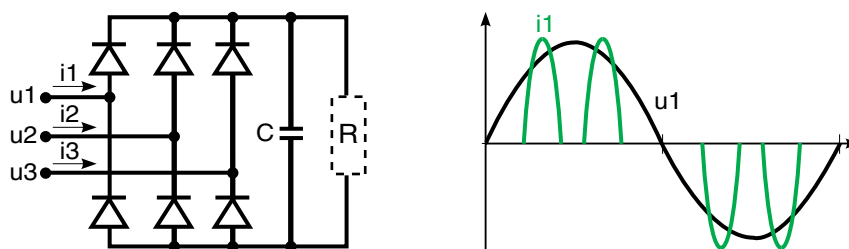


Рис. 6. Ток, потребляемый из сети трехфазным выпрямительным мостом, работающим на активную нагрузку с параллельно подключенным конденсатором

Несмотря на различие их формы, эти два тока имеют одинаковые канонические гармоники. Номера канонических гармоник токов, потребляемых из сети переменного тока выпрямителями, определяются выражением

$$n = kp \pm 1, \text{ где}$$

■ k – числа натурального ряда, $k = 1, 2, 3, 4, \dots$

■ p – кратность пульсаций выпрямленного напряжения, например:

- трехфазная мостовая схема, $p = 6$,
- шестипульсная мостовая схема, $p = 6$,
- двенадцатипульсная мостовая схема или комбинация двух шестипульсных со сдвигом 30° , $p = 12$.

Таким образом, для выпрямителей с $p = 6$ присутствуют гармоники $n = 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23$ и т.д., а для выпрямителей с $p = 12$: $n = 11, 13, 23, 25$ и т.д. Эти гармоники, называемые каноническими, имеют нечетные номера и при идеальной форме кривых тока, приведенной на рис.5, имеют в первом приближении величину $I_n = I_1/n$, где I_1 – ток основной гармоники.

При этом гармоники 15 и 17 имеют наибольшую амплитуду, но они могут быть ликвидированы при использовании двенадцатипульсной схемы выпрямления ($p = 12$).

На практике спектры токов гармоник существенно отличаются. Создаются дополнительные четные и нечетные гармоники небольшой амплитуды, которые называются неканоническими. Амплитуды канонических гармоник при этом изменяются. Причин этих отклонений несколько:

- несимметрия конструкции,
- неточность момента открытия тиристорov,
- время коммутации,
- неполное сглаживание выпрямленного тока.

Кроме этого в случае тиристорного моста может наблюдаться сдвиг гармоник по фазе в зависимости от угла открытия.

Смешанные диодно-тиристорные мосты являются генераторами четных гармоник. Использование таких мостов ограничено небольшими мощностями, так как вторая гармоника создает значительные помехи и ее трудно устранить.

Другие силовые преобразователи, такие как регуляторы мощности переменного тока промышленной частоты, циклические преобразователи и т.п. имеют переменные и более богатые спектры, чем выпрямители. Следует заметить, что они иногда заменяются выпрямителями, работающими по технологии широтно-импульсной модуляции (ШИМ), которые, работая на несущей частоте около 20 кГц, спроектированы так, чтобы генерировать невысокий уровень гармоник.

Гармонические токи нескольких преобразователей образуют векторную сумму на уровне сборных шин источника питания. Их фазовые углы обычно неизвестны, кроме неуправляемых выпрямителей. Это позволяет значительно снизить токи 5-й и 7-й гармоник, подключив к общим шинам два шестипульсных моста с трансформаторами, имеющими схемы D/Y и Y/Y и питающие одинаковую нагрузку постоянного тока.

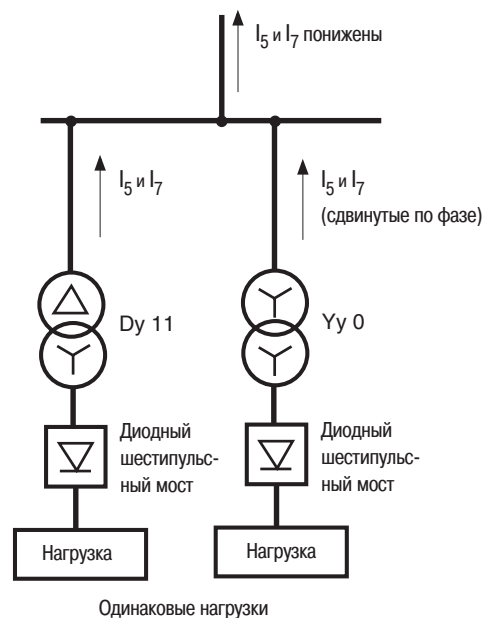


Рис. 7. Схема соединения, позволяющая значительно снизить 15 и 17

4.2 Светильники

Светильники с газоразрядными и люминесцентными лампами являются источниками гармоник. Коэффициент 3-й гармоники тока в некоторых современных компактных люминесцентных лампах может даже превосходить 100%.

Поэтому следует уделять повышенное внимание определению сечения нейтрального проводника, который, вследствие суммирования в нем токов третьей гармоники трех фаз, может быть перегрет.

4.3 Дуговые печи

Электродуговые печи, используемые в металлургии, работают на переменном или на постоянном токе.

Дуговая печь на переменном токе (см. рис. 8)

Дуга имеет нелинейную ВАХ, она нестабильна и несимметрична по фазам. Поэтому она генерирует, кроме нечетных, четные гармоники и непрерывный спектр (фоновый шум на всех частотах).

Спектральный уровень зависит от типа печи, от ее мощности, от рассматриваемой стадии процесса (расплавление, рафинирование ...).

Точное определение спектра может быть выполнено только с помощью измерений (пример: см. рис. 9).

Дуговая печь на постоянном токе (см. рис. 10)

Дуга получает питание от выпрямителя. Дуга более стабильна, чем на переменном токе. Спектр потребляемого тока включает в себя:

- спектр, похожий на спектр выпрямителя,
- непрерывный спектр, имеющий уровень ниже, чем на переменном токе.

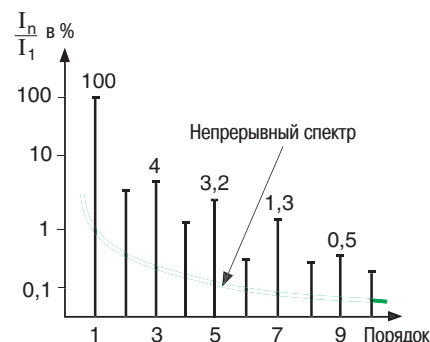


Рис. 9. Спектр тока печи переменного тока

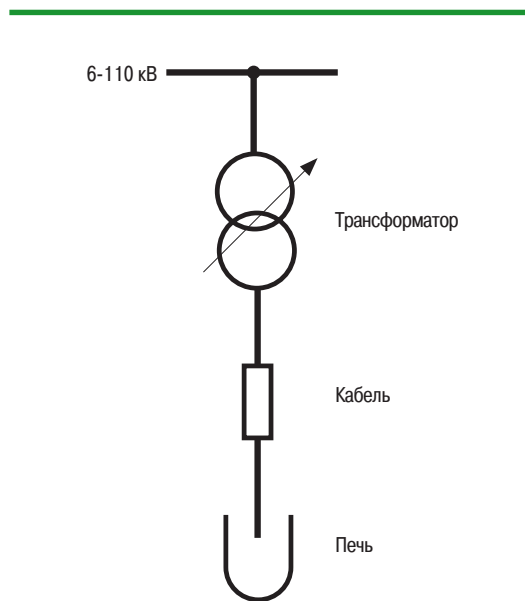


Рис. 8. Схема питания печи переменного тока

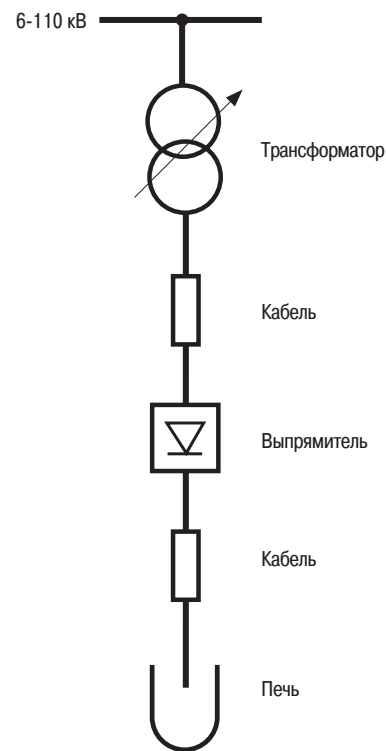


Рис. 10. Схема питания печи постоянного тока

4.4 Индуктивности с насыщающимся сердечником

Сопротивление такой индуктивности зависит от амплитуды тока, протекающего через нее, что вызывает значительную деформацию кривой этого тока.

Например, это происходит в малоагруженных трансформаторах, работающих с перевозбуждением (т.е. при повышенном напряжении).

4.5 Вращающиеся машины

Вращающиеся машины вырабатывают гармоники высокого порядка, небольшие по величине. Маломощные синхронные машины вырабатывают гармоники напряжения, кратные трем, которые могут вызвать:

- в нормальном режиме – нагрев сопротивления заземления нейтрали генератора;
- ложное срабатывание токовых реле защиты от замыкания на землю.

4.6 Модель, используемая в расчетах

Статические преобразователи и дуговые печи в расчетах можно рассматривать как генераторы токов высших гармоник (см. [рис. 11](#)).

В широком смысле, токи гармоник, производимые генераторами гармоник, не зависят от других нагрузок и от эквивалентного сопротивления сети. Эти токи можно рассматривать как токи, вносимые в сеть соответствующим оборудованием, для чего достаточно назначить им обратный знак.

Для дуговых печей это приближение является наиболее грубым. В этом случае замена ИГ источником тока должна быть скорректирована подбором величины параллельно подключенного сопротивления.

Учет гармоник напряжения, приходящих в точку подключения из питающей сети, возможен при помощи эквивалентной модели Нортон (см. [рис. 12](#)). Для каждой гармоники напряжения U_n определяется ток I_n с учетом сопротивления Z и сопротивления питаемой сети.

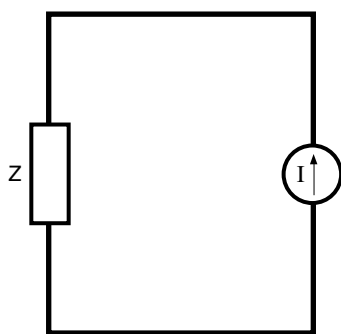


Рис. 11. Моделирование ИГ источником тока

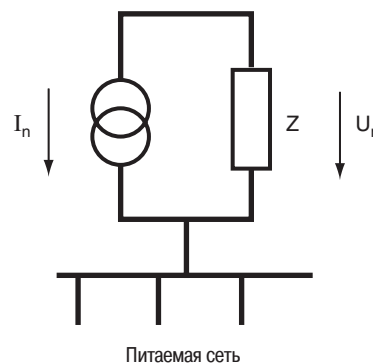


Рис. 12. Эквивалентная модель Нортон

4.7 Выполнение расчетов

Начальные фазы токов гармоник, если они известны, могут быть учтены при векторных расчетах. Для определенных однофазных ИГ представляет интерес осуществить моделирование, учитывая несимметрию между фазами.

Когда известны лишь амплитуды гармоник, генерируемых различными ИГ, техническая инструкция МЭК 61000-3-6 рекомендует использовать метод наложения токов различных ИГ.

5 Сеть с ИГ и конденсаторами, проблема усиления гармоник при резонансе

В «загрязненной» сети следует различать два случая:

- в сети нет силовых конденсаторов;
- к сети подключены силовые конденсаторы.

5.1 В отсутствие конденсаторных батарей, гармоническое загрязнение ограничено и пропорционально токам ИГ

В области повышенных частот гармоник характер реактивного сопротивления сети остается индуктивным.

Это индуктивное сопротивление пропорционально частоте: в первом приближении влияние нагрузки и активного сопротивления очень мало. Сопротивление сети относительно рассматриваемого узла может быть принято равным сопротивлению КЗ в нем.

Уровень напряжений гармоник может быть оценен с помощью отношения мощности ИГ и мощности короткого замыкания на шинах, к которым подключен ИГ. При этом реактивное сопротивление $X_{сс}$ пропорционально частоте (см. рис. 13).

На схеме рисунка 13:

$X_{сс}$ – индуктивность КЗ сети на шинах, к которым подключен (или подключены) ИГ,

I_n – ток гармоники n , потребляемый ИГ, откуда:

$$X_{сс_n} = L_{сс} \omega_n = L_{сс} n(2\pi f_1)$$

$$\text{Напряжение: } V_n = X_{сс_n} I_n = L_{сс} n(2\pi f_1) I_n$$

Гармоническое загрязнение находится в допустимых границах, если мощность ИГ не превышает определенной величины. Но нужно соблюдать осторожность, так как может возникнуть резонанс (см. ниже) с соседней сетью, имеющей КБ, и подключенной через трансформатор.

Примечание: В действительности реактивное гармоническое сопротивление X распределительной сети без конденсаторов можно считать пропорциональным частоте только приблизительно. Также обычно в расчетах сопротивление КЗ сети умножают на 2 или на 3, особенно если имеются серьезные сомнения по поводу характеристик сети.

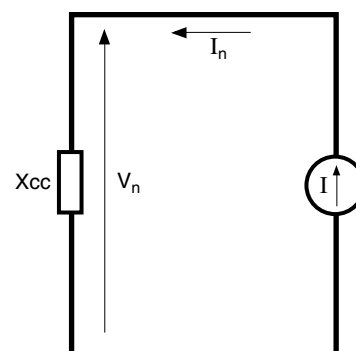


Рис. 13. Гармоническое напряжение V_n пропорционально току I_n , генерируемому ИГ

Таким образом: $X_n = k \cdot n \cdot X_1$, где $k = 2$ или 3 .

Действительно, составляющие гармонического сопротивления сети имеют различные виды: сопротивление КЗ энергосистемы, кабели, линии, трансформаторы, машины, другие нагрузки (освещение, нагрев, ...).

5.2 Токи высших гармоник, генерируемые ИГ могут быть опасно усилены благодаря присутствию КБ

На определенной частоте может возникнуть резонанс между КБ и реактивным сопротивлением сети, приведенным к зажимам батареи.

Если резонансная частота совпадает с частотой одного из токов, поступающих от ИГ, то происходит более или менее демпфированное усиление тока и напряжения этой гармоники.

Таким образом, возникает проблема, изучаемая в данном параграфе.

Этот резонанс называется параллельным или резонансом токов.

Что такое параллельный резонанс и почему он может вызвать опасное гармоническое загрязнение?

Для приблизительного расчета и анализа гармоник составляют эквивалентную схему сети, изображенную на **рис. 14**.

На этой схеме:

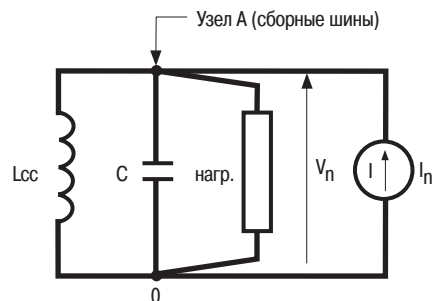
- L_{cc} – индуктивность КЗ питающей сети относительно сборных шин, к которым подключены ИГ и КБ,
- C – емкость фазы КБ,
- I_n – ток n -й гармоники ИГ,
- нагр. – линейная нагрузка (нагрев, электропривод).

Полное гармоническое сопротивление КЗ ЗАО относительно шин, к которым подключена КБ (узел А), зависит от питающей сети (L_{cc}), от КБ (C) и от нагрузки (нагр.), поэтому напряжение n -й гармоники: $V_n = Z_{АО} I_n$.

Кривые сопротивлений в зависимости от частоты, называемые также амплитудно-частотными характеристиками (АЧХ), показывают, что:

- при резонансной частоте индуктивное и емкостное сопротивление взаимно компенсируются, и результирующее реактивное сопротивление X стремится к бесконечности;
- реактивное сопротивление контура-пробки:
 - на низких частотах, включая основную, имеет индуктивный характер;
 - увеличивается с ростом частоты, становится максимальным на резонансной частоте f_{ar} , где резко меняет свой характер на емкостный;

а : эквивалентная схема для гармоник одной фазы



б : однолинейная схема

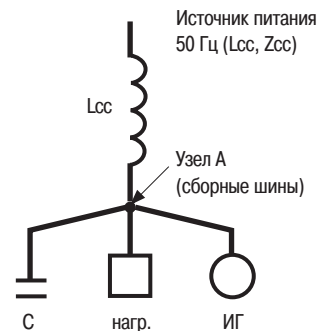


Рис. 14. Эквивалентные схемы цепи, обтекаемой токами высших гармоник и содержащей КБ

- снижается с дальнейшим ростом частоты;
- максимальное значение модуля полного сопротивления примерно равно $R = U^2/P$, где P – суммарная активная мощность линейной нагрузки (нагр.).

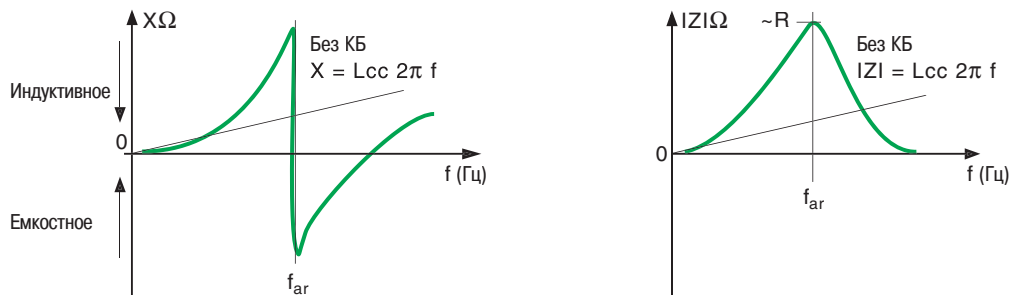


Рис. 15. Изменение реактивного сопротивления и модуля полного сопротивления эквивалентной схемы

Если по цепи протекает ток I_n , генерируемый ИГ, с частотой, равной резонансной частоте $f_{ар}$ параллельной цепи, то напряжение n -й гармоники может быть оценено, как: $V_n = R I_n$, где $n = n_{ар} = f_{ар}/f_1$.

Оценка $n_{ар}$

Порядок $n_{ар}$ резонанса токов есть отношение резонансной частоты $f_{ар}$ к основной (промышленной) частоте f_1 .

На **рисунке 16** представлена эквивалентная схема простой промышленной электрической сети, где КБ «С» питается от трансформатора, имеющего индуктивность КЗ L_T , подключенного к распределительной сети с индуктивностью КЗ $L_{сс}$.

$$f_{ар} = \frac{1}{2\pi \sqrt{(L_{сс} + L_T) C}}$$

Так как $L_{сс} \ll L_T$, то порядок резонансной гармоники зависит, в основном, от индуктивности L_T .

В общем случае порядок резонансной гармоники:

$$n_{ар} = \sqrt{\frac{S_{сс}}{Q}}, \text{ где:}$$

$S_{сс}$ – мощность КЗ на зажимах КБ,

Q – мощность КБ при приложенном к ней напряжении.

Обычно $S_{сс}$ выражается в МВА, и Q – в мвар.

Практические последствия:

■ Если порядок гармоники тока, приходящего от ИГ, соответствует или близок к порядку параллельного резонанса, то имеется опасность гармонического перенапряжения, особенно при малой нагрузке сети. Токи гармоник, протекающие по сети, при этом значительны по величине и представляют определенную опасность для конденсаторов.

■ Если частота параллельного резонанса соответствует рабочей частоте телеуправления, используемой в распределительной сети, то есть опасность нарушения работы соответствующего оборудования.

Чтобы избежать опасностей, которые представляет резонанс токов, нужно сдвинуть его частоту за пределы генерируемого спектра или демпфировать его.

Сопротивление КЗ сети обычно известно с невысокой точностью. Кроме того, в эксплуатации оно меняется в широких пределах. Все это вызывает значительные изменения частоты параллельного резонанса.

Необходимо установить такое значение этой частоты, которое не соответствует порядку гармоник тока, поступающих от ИГ. Это достигается включением реактора последовательно с КБ. Схема такой электрической цепи изображена на **рисунке 17**, где $V_n = Z_{A0} I_n$.

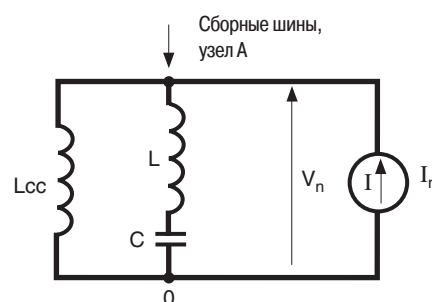


Рис. 17. Реактор, включенный последовательно с конденсатором

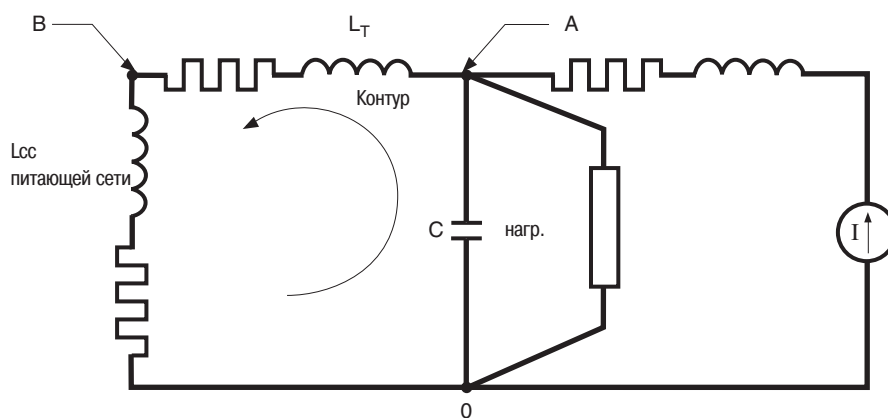


Рис. 16. Конденсатор вместе с сопротивлением питающей сети образует резонансную цепь

В этой цепи между L и C может возникнуть последовательный резонанс или резонанс напряжений. В противоположность этому резонансу, который дает минимальное значение сопротивления, параллельный резонанс часто называют «антирезонанс».

Формула частоты антирезонанса:

$$f_{ar} = \frac{1}{2\pi \sqrt{(L_{cc} + L) C}}$$

L_{cc} обычно значительно меньше L. Поэтому из формулы видно, что присутствие индуктивности L, включенной последовательно с конденсатором, делает частоту f_{ar} менее чувствительной к изменениям индуктивности КЗ L_{cc} (относительно точки подключения – сборных шин А).

Последовательный резонанс

Ветвь, образованная индуктивностью L и конденсатором C (см. рис. 18) образуют последовательную резонансную цепь, имеющую полное сопротивление

$Z = r + j(L\omega - 1/C\omega)$, представляющее:

- минимальное активное сопротивление r (активное сопротивление катушки индуктивности) на частоте резонанса f_r ,

- емкостное реактивное сопротивление на частотах ниже f_r ,
- индуктивное реактивное сопротивление на частотах выше f_r , где:

$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$$

Кривые рисунка 19 представляют зависимость сопротивлений сети, включающей сопротивления КЗ и последовательной ветви L-C относительно сборных шин А (см. также рис. 15). Частота f_{ar} зависит от L_{cc} , от L и от C, тогда как f_r зависит только от L и C. Поэтому, чем меньше L_{cc} по сравнению с L, тем ближе друг к другу частоты f_{ar} и f_r .

Компенсация реактивной мощности и величина напряжения на зажимах конденсатора зависят от L и от C.

В зависимости от расположения частоты последовательного резонанса по отношению к спектру гармоник, имеются два различных варианта выбора величины индуктивности реактора L:

- защитный реактор (последовательный резонанс вне спектра гармоник);
- реактор фильтра (последовательный резонанс на одной из гармоник спектра).

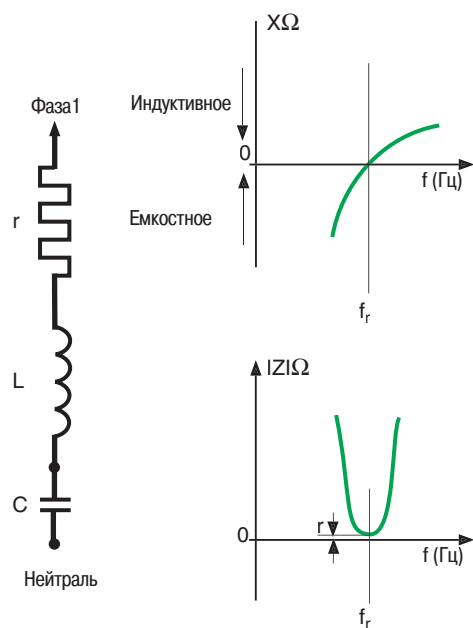


Рис. 18. Сопротивление последовательной резонансной цепи

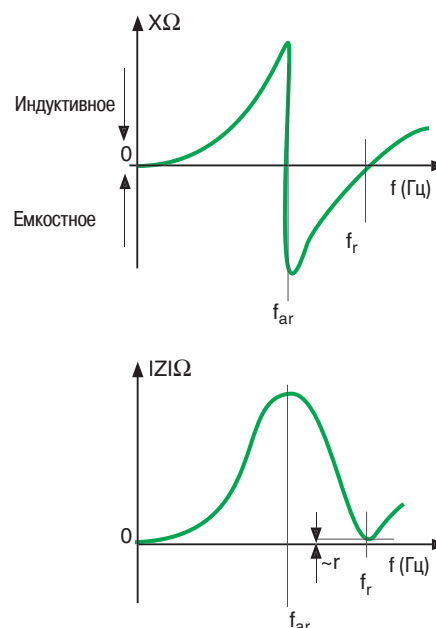


Рис. 19. Сопротивление сети по отношению к точке А

6 Защитный реактор

Он позволяет защитить КБ от перегрузки токами высших гармоник.

Обратимся по-прежнему к схеме рис. 17. Выбор индуктивности L в этой схеме сделан так, чтобы ветвь L-C (L – защитный реактор и C – силовой конденсатор) имела индуктивный характер во всем спектре гармоник.

Очевидно, что при этом резонансная частота f_r этой ветви будет располагаться ниже частотного спектра ИГ.

Ветвь L-C и питающая сеть (L_{cc}) на частотах спектра имеют индуктивный характер сопротивления и токи высших гармоник, поступающие от ИГ, делятся обратно пропорционально сопротивлениям. Токи, поступающие в ветвь L-C невелики, что позволяет защитить КБ.

Более значительная доля токов гармоник протекает по остальной части сети, в особенности через сопротивление КЗ.

Зависимость полного сопротивления сети относительно точки подключения ветви L-C изображена на рис. 20.

В области спектра токов гармоник антирезонанса больше нет. Таким образом, применение защитного реактора дает два преимущества:

- устраняется опасность протекания больших токов гармоник через КБ;
- частично снижаются значительные искажения синусоидальности кривой напряжения, не приводя все же коэффициент искажения в допустимые границы.

В то же время следует соблюдать некоторые предосторожности:

- В сети не должны присутствовать другие КБ, которые могли бы придать емкостный характер сопротивлению в области спектра.
- Резонансная частота f_r в сетях 50 Гц обычно выбирается в пределах 135-225 Гц. Поэтому следует следить за тем, чтобы антирезонанс не совместился с частотой телеуправления распределительной сети, так как это может вызвать повышенную нагрузку генераторов высокой частоты (175 и 188 Гц).
- Из-за непрерывного спектра гармоник в сетях с дуговыми печами применение защитных реакторов требует определенной предосторожности и особого изучения.

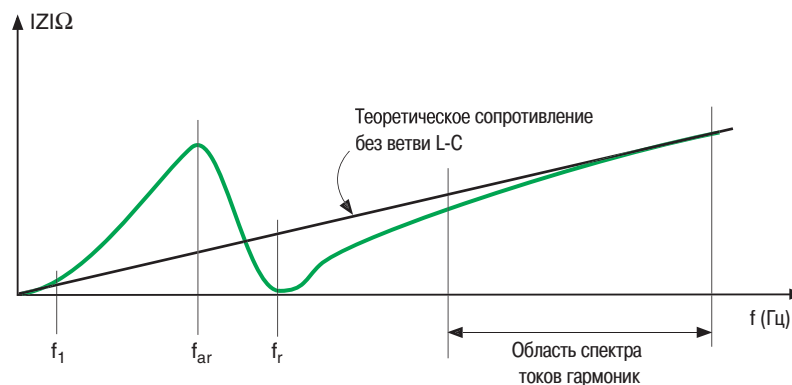


Рис. 20. При f_r значительно меньшей спектра гармоник, защита конденсаторов обеспечена

7 Фильтры

Использование фильтров имеет целью ограничить гармоники напряжения на заданном уровне. Существует три класса фильтров, позволяющих снизить гармоники напряжения:

- резонансный шунт,
- демпфированные фильтры
- активные фильтры.

7.1 Резонансный шунт

Фильтр типа резонансный шунт (см. рис. 18) образован последовательно соединенными L-C, резонансная частота которых

$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$$

совпадает с гармоникой напряжения, которую нужно устранить.

Это действие принципиально отличается от действия защитного реактора.

На частоте f_r резонансный шунт имеет минимальное сопротивление, сниженное до величины активного сопротивления реактора. Он забирает на себя почти полностью ток гармоники частотой f_r , поступающий от ИГ, обеспечивая низкое напряжение гармоники частотой f_r , которое равно произведению сопротивления r и тока, проходящего через фильтр.

В принципе, количество фильтров, которые нужно подключить к шинам, должно соответствовать количеству гармоник, которые нужно устранить из напряжения на этих шинах. Их совокупность образует батарею фильтров.

На **рисунке 21** представлен пример гармонического сопротивления сети, оснащенной батареей из четырех фильтров гармоник с номерами 5, 7, 11 и 13. Он показывает, что имеется столько же антирезонансов,

сколько фильтров. Эти антирезонансы должны находиться между гармониками спектра. Поэтому при необходимости разделить батарею на секции нужно сделать тщательный анализ кривой сопротивления.

Основные характеристики резонансного шунта

Они зависят от порядка фильтра $n_r = f_r / f_1$, где:

- f_r – резонансная частота фильтра,
- f_1 – основная или промышленная частота, например 50 Гц.

Этими характеристиками являются:

- Компенсирующая реактивная мощность Q_{var}

Резонансный шунт, имея емкостный характер на частотах ниже резонансной, компенсирует реактивную мощность на промышленной частоте. Поэтому его часто называют «фильтрокомпенсирующее устройство или ФКУ».

Компенсирующая реактивная мощность фильтра при рабочем напряжении на шинах, к которым он подключен, определяется по формуле:

$$Q_{var} = \frac{n_r^2}{n_r^2 - 1} U_1^2 C 2\pi f_1$$

(напоминание: индекс 1 означает основную гармонику);
C – емкость одной фазы батареи, соединенной в звезду.

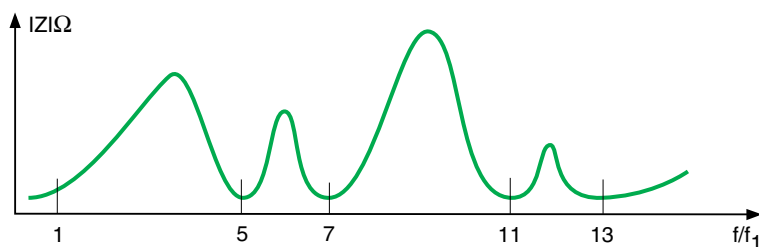


Рис. 21. Сопротивление сети, оснащенной фильтрами типа шунт.

На первый взгляд кажется парадоксальным, что присутствие индуктивности увеличивает вырабатываемую реактивную мощность.

Однако, это объясняется повышением напряжения промышленной частоты f_1 на зажимах батареи, вызванном присутствием индуктивности.

■ Характеристическое сопротивление $X_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$

■ Добротность фильтра $q = X_0/r$

Эффективный фильтр должен иметь высокую добротность, следовательно на частоте f_1 : $r \ll X_0$.

Порядок величины q :

- 75 для индуктивности без сердечника,
- выше 75 для индуктивности с сердечником.

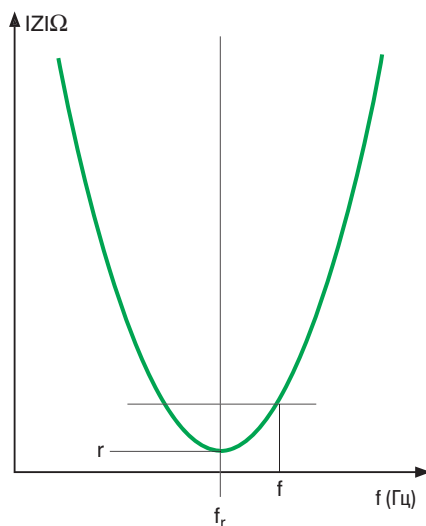


Рис. 22. Кривая $z = f(f)$ резонансного шунта

■ Полоса пропускания (см. рис. 22) в относительных

$$\text{единицах } BP = \frac{1}{q} = 2 \frac{f - f_r}{f_r} = \frac{r}{X_0}$$

■ Активное сопротивление реактора $r = X_0/q$

Оно зависит от поверхностного эффекта и определяется на частоте f_r . Оно равно также полному сопротивлению резонансного шунта на резонансной частоте.

■ Потери, обусловленные протеканием емкостного тока

$$\text{основной гармоники } p_1 = \frac{Q_{var}}{q \eta_r}$$

где:

- Q_{var} – компенсирующая способность фильтра на основной гармонике,
- p_1 – потери в фильтре от тока основной гармоники (Вт).

■ Потери, обусловленные протеканием тока n -й гармоники не могут быть выражены простой формулой; их нижняя граница определяется выражением

$$p_n = \frac{U_n^2}{r}$$

где U_n – линейное напряжение n -й гармоники на шинах с учетом работы фильтра.

На практике качественные характеристики резонансного шунта ограничены неточностью его настройки. Поэтому следует предусмотреть дополнительные меры:

- чтобы компенсировать недостатки, связанные с разбросом характеристик фильтра при его изготовлении, на реакторе могут быть предусмотрены регулировочные ответвления;
- чтобы допустить определенные отклонения f_1 (частоты сети) и f_r (вызванные изменением емкости конденсаторов в зависимости от температуры), можно снизить чувствительность фильтра к неточности настройки путем нахождения компромисса между его добротностью q и качеством фильтрации.

7.2 Демпфированные (широкополосные) фильтры

Демпфированный фильтр второго порядка

Для дуговых печей резонансный шунт должен быть демпфирован.

Действительно, при непрерывном спектре дуговой печи имеется вероятность совпадения частоты тока, поступающего от печи, с частотой антирезонанса. Поэтому недостаточно понизить напряжение характеристических гармоник, но нужно также снизить антирезонансы, то есть демпфировать их. С другой стороны, установка большого числа резонансных шунтов неэкономична. Решение заключается в применении одного широкополосного фильтра, который обладает следующими свойствами:

- демпфировать (сгладить) антирезонансы,
- снижать напряжения гармоник с частотами равными или большими резонансной, откуда название «демпфированный фильтр верхних частот»,
- быстро гасить переходный процесс включения фильтра.

Демпфированный фильтр второго порядка образован из резонансного шунта путем подключения демпфирующего сопротивления R параллельно реактору.

На **рисунке 23** представлена схема одной из трех фаз фильтра.

Демпфированный фильтр второго порядка имеет нулевое результирующее реактивное сопротивление (реактанс) на частоте f_r большей, чем частота f резонансного шунта:

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \quad \text{и} \quad f_r = \frac{1 + Qq}{2\pi q \sqrt{(Q^2 - 1)LC}}$$

где:

Q – добротность демпфированного фильтра,

q – добротность реактора.

Частоту f_r фильтра подбирают совпадающей с нижней (по частоте) гармоникой спектра, так как обычно она имеет максимальную амплитуду.

При увеличении Q (или R) f_r стремится к f , что позволяет заключить, что резонансный шунт – это предельный случай демпфированного фильтра второго порядка. Не следует путать Q – добротность фильтра и Q_{var} – компенсирующую способность фильтра.

Работа демпфированного фильтра второго порядка:

■ На частотах ниже f_r

Демпфирующее сопротивление уменьшает полное сопротивление сети при антирезонансе, что приводит к снижению уровня гармоник напряжения.

■ На резонансной частоте f_r

Возможно снижение напряжения гармоники до заданного уровня, так как на этой частоте из-за чисто активного сопротивления фильтра резонанс между сетью и фильтром возникнуть не может.

В то же время это сопротивление, будучи более высоким, чем сопротивление r реактора, приводит к ухудшению качества фильтрации.

■ На частотах выше f_r

Фильтр имеет сопротивление того же характера (индуктивного), что и сеть, что позволяет ему поглощать гармоники спектра с частотами выше f_r и особенно непрерывный спектр. Однако, возможное присутствие антирезонансов в сопротивлении сети без фильтра, обусловленное существующими КБ, понижает качество фильтрации.

Поэтому при анализе сети существующие КБ должны быть учтены или иногда перестроены.

Основные электрические характеристики демпфированного фильтра второго порядка зависят от порядка резонансной частоты $n_r = f_r / f_1$, где:

■ f_r – резонансная частота фильтра,

■ f_1 – основная или промышленная частота, например 50 Гц.

Этими характеристиками являются:

■ Компенсирующая реактивная мощность Q_{var} .

Для демпфированного фильтра второго порядка при рабочем напряжении основной гармоники U_1 она практически равна мощности резонансного шунта с одинаковыми индуктивностью и емкостью:

$$Q_{var} = \frac{n_r^2}{n_r^2 - 1} U_1^2 C 2\pi f_1$$

C – емкость одной фазы батареи, соединенной в звезду.

■ Характеристическое сопротивление $X_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$

■ Добротность фильтра $q = X_0 / r$, где сопротивление r определяется с учетом поверхностного эффекта при частоте f_r .

■ Добротность фильтра $Q = R / X_0$. Добротность применяемых фильтров обычно находится в пределах от 2 до 10.

■ Потери, обусловленные компенсирующим током основной частоты и токами гармоник. Они больше, чем в резонансном шунте и могут быть определены только при расчете сети.

Демпфированный фильтр используется один или в батарее из двух фильтров, или совместно с резонансным шунтом. В последнем случае резонансный шунт настраивается на самую низкую частоту спектра.

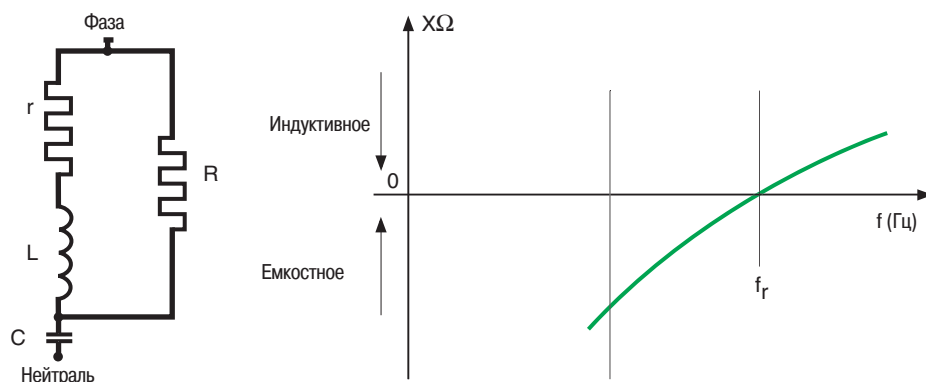


Рис. 23. Демпфированный фильтр второго порядка

Рисунок 24 позволяет сравнить графики сопротивления сети, содержащей резонансный шунт или демпфированный фильтр второго порядка.

Другие демпфированные фильтры

Как разновидности фильтра второго порядка, существуют и другие демпфированные фильтры, используемые редко.

■ Демпфированный фильтр третьего порядка (см. **рис. 25а**)

Фильтр третьего порядка более сложен в проектировании и предназначен для получения большей компенсирующей мощности, чем фильтр второго порядка.

Фильтр третьего порядка получается из фильтра второго порядка путем включения дополнительной КБ C2 последовательно с сопротивлением R. Такая схема позволяет снизить потери от прохождения тока основной гармоники.

Применение C2 позволяет также улучшить поведение фильтра на частотах ниже резонансной, что важно для снижения антирезонанса. Фильтр третьего порядка должен ставиться на нижние частоты спектра.

Сложность фильтра третьего порядка и, следовательно, его высокая стоимость приводят к тому, что в промышленности чаще предпочитают применять фильтр второго порядка.

■ Демпфированный фильтр типа C (см. **рис. 25в**).

В этом фильтре дополнительная батарея C2 включена последовательно с реактором. Он имеет такие же свойства, что и фильтр третьего порядка.

■ Двойной демпфированный фильтр (см. **рис. 25с**).

Составленный из двух резонансных шунтов, соединенных при помощи сопротивления R, этот фильтр хорошо сглаживает антирезонанс, расположенный между двумя резонансными частотами.

■ Резонансный шунт с низкой добротностью

Этот фильтр, имеющий свойства демпфированного фильтра с широкой полосой пропускания, используется в специфических случаях: он подходит только для маломощных установок, не предназначенных для компенсации реактивной мощности, так как реактор, обладая очень высоким активным сопротивлением (часто благодаря последовательному включению дополнительного сопротивления) вызывает потери, неприемлемые в промышленных установках.

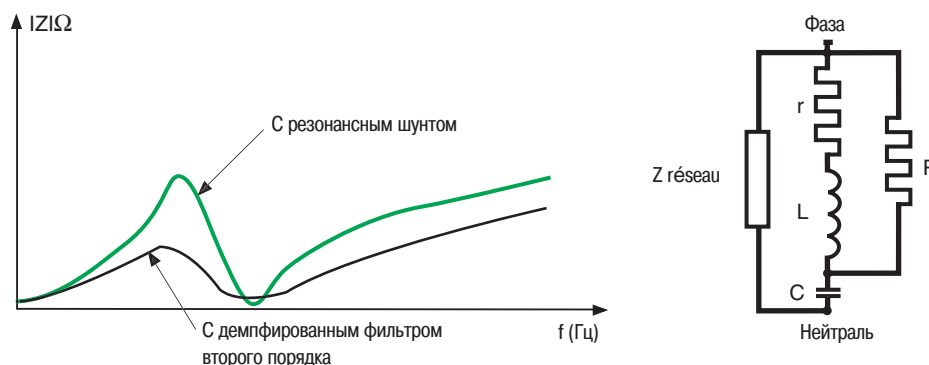


Рис. 24. Сопротивление относительно точки A сети, содержащей либо фильтр второго порядка, либо резонансный шунт

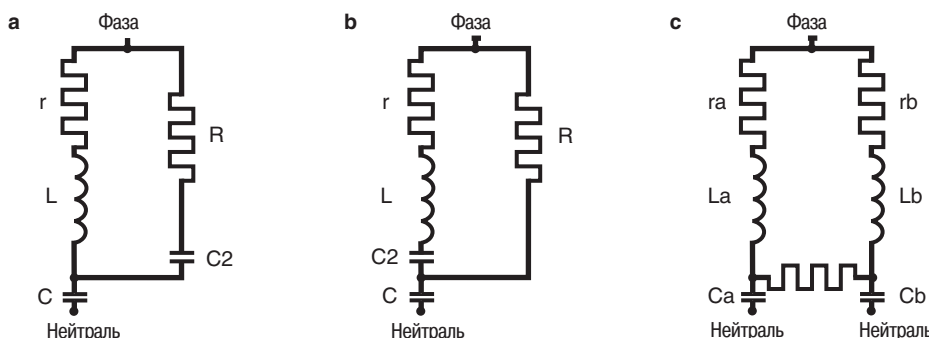


Рис. 25. Демпфированный фильтр третьего порядка (а); фильтр типа C (в); двойной демпфированный фильтр (с)

7.3 Активные фильтры

Активный фильтр позволяет нейтрализовать помеху, генерируя величину, равную помехе, но имеющую противоположную фазу. Активные фильтры часто используют в дополнение к пассивным фильтрам,

описанным в данной главе. Такое сочетание называется гибридными фильтрами. Эти устройства описаны в Технической тетради № 183: «Harmoniques: convertisseurs propres et compensateurs actifs».

8 Пример расчета и анализа упрощенной сети

На **рисунке 26** приведена схема упрощенной сети, включающей шестифазный выпрямитель мощность 2000 кВА, генерирующий спектр токов высших гармоник и три варианта компенсирующих устройств:

- одна КБ мощностью 1000 квар;
- одна КБ мощностью 1000 квар, снабженная защитным реактором;
- батарея из двух ФКУ: один резонансный шунт пятой гармоники, второй – демпфированный фильтр второго порядка, настроенный на седьмую гармонику.

- для обеспечения нормативного $\cos\varphi$? требуется компенсирующая мощность 1000 квар;
- напряжения высших гармоник в питающей сети 20 кВ малы и для упрощения расчетов не учитываются.

На данном примере можно сравнить характеристики трех вариантов решения поставленной задачи, но, очевидно, нельзя обобщать численные результаты.

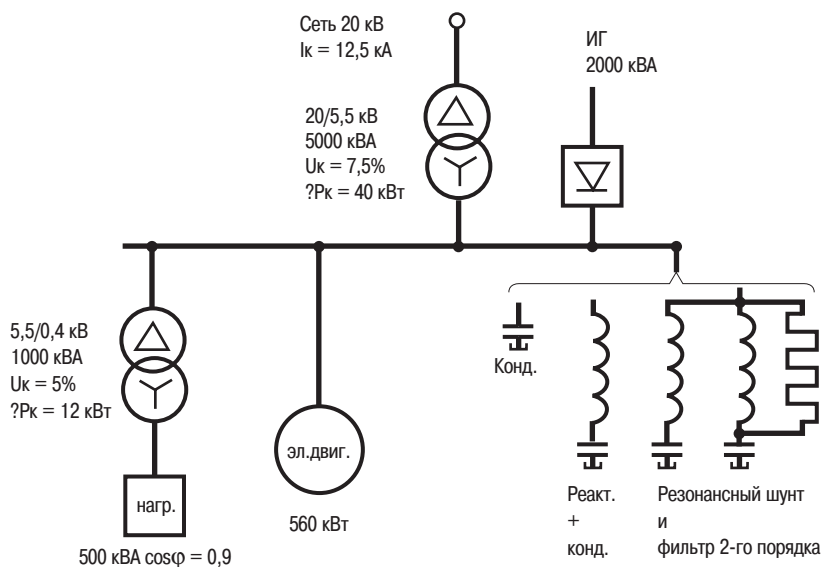


Рис. 26. Электроустановка с ИГ, конденсаторами и фильтрами

8.1 Подключение одной КБ

Так как на частоте $7,75 \cdot f_1$ наблюдается резонанс токов между КБ и эквивалентным сопротивлением сети, поэтому кривая полного сопротивления сети относительно точки присоединения ИГ (шины 5,5 кВ) имеет максимум (антирезонанс) около 7-й гармоники спектра токов, поступающих от ИГ (см. **рис. 27**). Результатом этого является недопустимо высокий коэффициент 7-й гармонической составляющей напряжения $KU(7) = 11\%$ (см. **рис. 28**).

Также недопустимо высоки:

- коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения на шинах 5,5 кВ: $KU = 12,8\%$, тогда, как его нормально допустимый уровень составляет 5%;
 - действующее значение тока КБ составляет 1,34 номинального, что превышает допустимую нагрузку, установленную на уровне 1,3 (см. **рис. 29**).
- Вывод: вариант одной КБ не может быть принят.

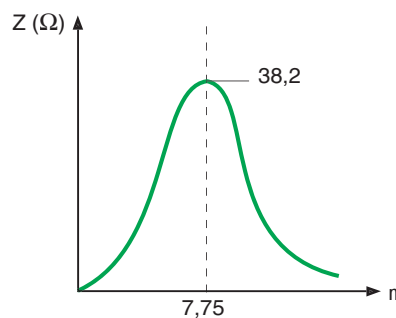


Рис. 27. Кривая гармонического сопротивления ($AЧX$) относительно шин 5,5 кВ (точки подключения ИГ) в сети с одной КБ

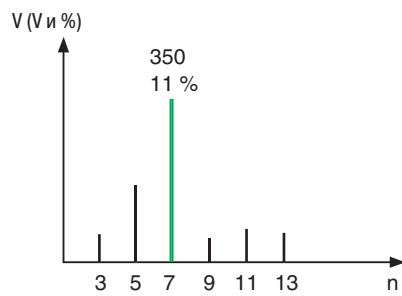


Рис. 28. Спектр напряжений гармоник на шинах 5,5 кВ в сети с одной КБ

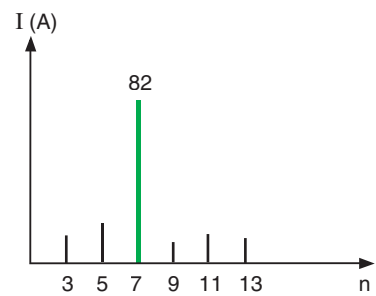


Рис. 29. Спектр токов гармоник, проходящих через КБ в сети с одной КБ

8.2 Подключение КБ, защищенной реактором

Частота резонанса напряжений КБ-реактор установлена $f_r = 4,8 f_1$.

Гармоническое сопротивление (см. рис. 30)

Кривая гармонического сопротивления (АЧХ) сети относительно шин 5,5 кВ (точки подключения ИГ) имеет максимум 16 Ом (антирезонанс) порядка 4,25. Низкое индуктивное сопротивление на 5-й гармонике способствует хорошему ее гашению.

Искажение кривой напряжения (см. рис. 31)

Коэффициенты отдельных гармоник напряжения на шинах 5,5 кВ: 1,58% (7-я), 1,5% (11-я), и 1,4% (13-я) могут быть значительными для некоторых чувствительных ЭП. Но, в целом, коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения 2,63% не превышает допустимого предела.

На уровне 20 кВ этот коэффициент не более 0,35%, что не вызывает нареканий со стороны питающей сети.

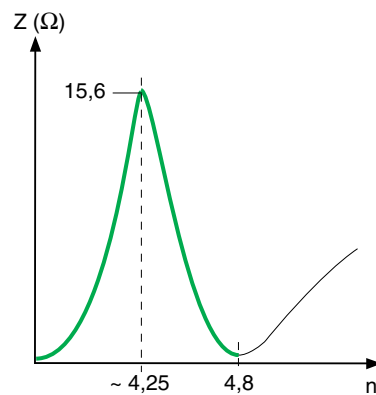


Рис. 30. Кривая гармонического сопротивления (АЧХ) относительно шин 5,5 кВ (точки подключения ИГ) в сети с КБ, защищенной реактором

Токвая нагрузка конденсаторов (см. рис. 32)

Действующее значение полного тока конденсаторов, включая токи высших гармоник, составляет 1,06 номинального, что не превышает допустимый предел 1,3.

Вывод: вариант применения защитного реактора для КБ лучше предыдущего с одной КБ.

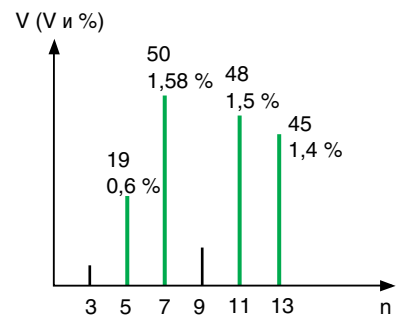


Рис. 31. Спектр гармоник напряжения в сети 5,5 кВ с КБ, защищенной реактором. Фазные напряжения гармоник выражены в Вольтах и в процентах.

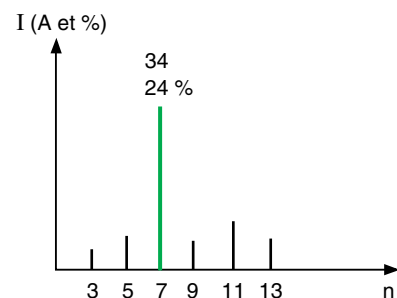


Рис. 32. Спектр токов гармоник, проходящих через конденсаторы в сети с КБ, защищенной реактором

8.3 Подключение шунтового резонансного фильтра 5-й гармоники и демпфированного фильтра 7-й гармоники

В данном примере распределение реактивных мощностей между двумя фильтрами сделано так, чтобы обеспечить после фильтрации одинаковые напряжения 5-й и 7-й гармоник, что не является обязательным.

Гармоническое сопротивление (см. рис. 33)

Кривая гармонического сопротивления (АЧХ) сети относительно шин 5,5 кВ (точки подключения ИГ) имеет максимум 9,5 Ом (антирезонанс) порядка 4,7.

На 5-й гармонике сопротивление падает до значения активного сопротивления реактора, что способствует успешному ее гашению.

На 7-й гармонике низкое чисто активное сопротивление демпфированного фильтра также благоприятно для снижения величины ее напряжения.

Для гармоник более высоких порядков сопротивление демпфированного фильтра также невелико, что также способствует снижению их напряжений.

Эта кривая лучше по сравнению с рассмотренным выше вариантом КБ, оснащенной защитным реактором.

Искажение кривой напряжения (см. рис. 34)

Коэффициенты отдельных гармоник напряжения порядков 5, 7, 11, 13 составляют соответственно 0,96%, 0,91%, 1,05% и 1%, что допустимо для большинства чувствительных ЭП. Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения составляет 1,96%.

На уровне 20 кВ это коэффициент не более 0,26%, что удовлетворяет питающую сеть.

Токвая нагрузка конденсаторов

Учитывая повышенное напряжение основной гармоники, а также напряжения и токи высших гармоник, конденсаторы должны быть выбраны с запасом.

Данный пример показывает, как решается задача в первом приближении. Но на практике, кроме расчета элементов (L-r-C-R), перед определением всех параметров следует принять во внимание:

- спектры токов, проходящих через реакторы, присоединенные к конденсаторам,
- результирующее напряжение на зажимах конденсаторов,
- разброс характеристик и регулировочные отклонения реакторов (если эти отклонения необходимы),
- спектры токов, проходящих через активные сопротивления демпфированных фильтров и их суммарное действующее значение,

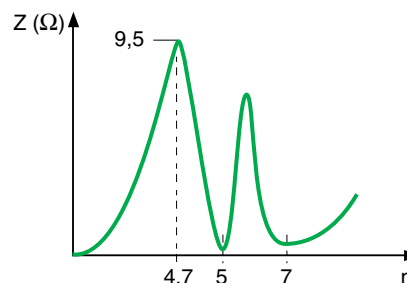


Рис. 33. Кривая гармонического сопротивления (АЧХ) относительно шин 5,5 кВ (точки подключения ИГ) в сети, оснащенной шунтовым резонансным фильтром 5-й гармоники и демпфированным фильтром 7-й гармоники.

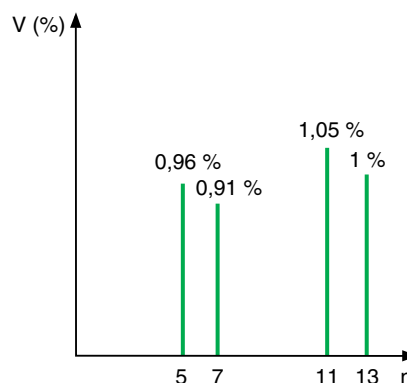


Рис. 34. Спектр гармоник напряжения в сети 5,5 кВ, оснащенной шунтовым резонансным фильтром 5-й гармоники и демпфированным фильтром 7-й гармоники

- величины напряжения и энергии на элементах фильтров при переходных процессах включения.

Все дальнейшие, более сложные расчеты, требующие знания как сети, так и электрооборудования, имеют конечной целью определить все электрические параметры, являющиеся исходными данными, необходимыми для изготовления фильтров.

9 Заключение

Силовые статические преобразователи как ЭП встречаются все чаще в промышленных распределительных сетях, дуговые печи широко применяются в развивающейся электрометаллургии. Все эти потребители, являющиеся источниками высших гармоник, обычно требуют компенсации реактивной мощности и, следовательно, установки КБ. Эти КБ, если они установлены без мер предосторожности, могут войти в резонанс с индуктивностями сети и усилить помехи от высших гармоник.

Поэтому проектировщики и эксплуатационники промышленных сетей могут столкнуться с такими техническими проблемами.

В данном выпуске технической коллекции рассмотрены основные гармонические помехи и технические меры, позволяющие их ограничить.

Не претендуя ни на исчерпывающее изучение проблемы, ни на сборник всех опытных данных, настоящее издание должно помочь справиться с возникшими трудностями или, по крайней мере, упростить техническое общение со специалистами.

Напомним, что в составе Научно-технической дирекции Шнейдер Электрик, начиная с 1970 г., работает группа, специализирующаяся на изучении процессов в электрических сетях, а также группа, занимающаяся разработкой фильтров (Rectiphase).

Библиография

Нормы и рекомендации

- CEI 60146 : Convertisseurs à semi-conducteurs.
- CEI 60287 : Calcul du courant admissible dans les câbles en régime permanent.
- CEI 60871 : Condensateurs de compensation de tension supérieure à 660 V.
- CEI 61000-2-2 : Niveaux de compatibilité pour les perturbations conduites basse fréquence sur les réseaux publics d'alimentation BT.
- CEI 61000-2-4 : Niveaux de compatibilité dans les installations industrielles pour les perturbations conduites à basse fréquence.
- CEI 61000-3-2 : Limites pour les émissions de courants harmoniques pour les appareils absorbant jusqu'à 16 A par phase.
- CEI 61000-3-4 : Limitation des émissions de courants harmoniques dans les réseaux BT pour les matériels ayant un courant assigné supérieur à 16 A par phase.
- NF C 54-100 : Condensateurs de compensation de tension inférieure à 660 V.
- HN 53 R01 (mai 81) : Rapport d'orientation générale EDF. Aspects particuliers de l'alimentation électrique des équipements informatiques et électroniques sensibles.
- IEEE 519 : Recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems - 1992.

Технические тетради Шнейдер Электрик

- Les perturbations électriques en BT.
R. CALVAS, Cahier Technique n° 141
- Harmoniques : convertisseurs propres et compensateurs actifs.
E. BETTEGA, J.N. FIORINA,
Cahier Technique n° 183

Различные публикации

- Direct current transmission, volume 1.
E. W. KIMBARK.
Editeur : J. WILEY and SONS.
- Perturbations des réseaux industriels et de distribution. Compensation par procédés statiques. Résonances en présence des harmoniques créées par les convertisseurs de puissance et les fours à arc associés à des dispositifs de compensation.
Michel LEMOINE DER EDF.
RGE T 87 n° 12, 12/78.
- Perturbations des réseaux industriels et de distribution. Compensation par procédés statiques. Perturbations de tension affectant le fonctionnement des réseaux-fluctuations brusques, flicker, déséquilibre et harmoniques.
M. CHANAS SER-DER EDF.
RGE T 87 n° 12, 12/78.
- Pollution de la tension.
P. MEYNAUD SER-DER EDF.
RGE T89 n° 9, 09/80.
- La maîtrise des harmoniques sur les réseaux industriels et tertiaires.
Cahiers de l'ingénierie EDF, 12/96 et 04/97.
- Origine et nature des perturbations dans les réseaux industriels et de distribution.
Guy BONNARD SER-DER-EDF.
RGE 1/82.
- Réduction des perturbations électriques sur le réseau avec le four à arc en courant continu.
G. MAURET, J. DAVENE.
IRSID SEE LYON 05/83.
- Line harmonics of converters with DC Motor Loads.
A.DAVID GRAHAM and
EMIL T. SCHONHOLZER
IEEE transactions on industry applications
Vol IA 19 n° 1, 02/83.
- Filtrage d'harmoniques et compensation de puissance réactive.
Optimisation des installations de compensation en présence d'harmoniques.
P. SGARZI, S.THEOLEYRE.
Journal SEE RGE n° 6, 06/88.
- Electrical Power Systems Quality.
DUGAN, McGRANAGAN, BEATY.
McGraw-Hill, 1996.
- Les harmoniques et les installations électriques.
A. KOUYOUMDJIAN.
SCHNEIDER ELECTRIC, 05/98
(réf. MD1HRM1F).

Литература на русском языке

- ГОСТ 13109-97 Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
- Дж. Аррилага и др. Гармоники в электрических системах, Москва, Энергоатомиздат, 1990.
- Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий, Москва, Энергоатомиздат, 2000.
- Карташев И.И. и др. Управление качеством электроэнергии, Москва, Издательский дом МЭИ, 2006.

Для заметок

Schneider Electric в странах СНГ

Азербайджан

Баку
AZ 1008, ул. Гарабах, 22
Тел.: (99412) 496 93 39
Факс: (99412) 496 22 97

Беларусь

Минск
220030, ул. Белорусская, 15, офис 9
Тел.: (37517) 226 06 74, 227 60 34
227 60 72

Казахстан

Алматы
050050, ул. Табачнозаводская, 20
Швейцарский Центр
Тел.: (727) 244 15 05 (многоканальный)
Факс: (727) 244 15 06, 244 15 07

Астана

ул. Бейбитшилик, 18
Бизнес-центр «Бейбитшилик 2002», офис 402
Тел.: (7172) 91 06 69
Факс: (7172) 91 06 70

Атырау

060002, ул. Абая, 2-А
Бизнес-центр «Сугас - С», офис 407
Тел.: (7122) 32 31 91, 32 66 70
Факс: (7122) 32 37 54

Россия

Волгоград
400001, ул. Профсоюзная, 15/1, офис 12
Тел.: (8442) 93 08 41

Воронеж

394026, пр-т Труда, 65
Тел.: (4732) 39 06 00
Тел./факс: (4732) 39 06 01

Екатеринбург

620219, ул. Первомайская, 104, офисы 311, 313
Тел.: (343) 217 63 37, 217 63 38
Факс: (343) 349 40 27

Иркутск

664047, ул. Советская, 3 Б, офис 312
Тел./факс: (3952) 29 00 07

Казань

420107, ул. Спартаковская, 6, этаж 7
Тел.: (843) 526 55 84 / 85 / 86 / 87 / 88

Калининград

236040, Гвардейский пр., 15
Тел.: (4012) 53 59 53
Факс: (4012) 57 60 79

Краснодар

350020, ул. Коммунаров, 268, офисы 316, 314
Тел./факс: (861) 210 06 38, 210 06 02

Красноярск

660021, ул. Горького, 3 А, офис 302
Тел.: (3912) 56 80 95
Факс: (3912) 56 80 96

Москва

129281, ул. Енисейская, 37
Тел.: (495) 797 40 00
Факс: (495) 797 40 02

Мурманск

183038, ул. Воровского, д. 5/23, офис 739
Тел.: (921) 942 57 16
Факс: (495) 797 40 02

Нижний Новгород

603000, пер. Холодный, 10 А, офис 1.5
Тел.: (831) 278 97 25
Тел./факс: (831) 278 97 26

Новосибирск

630005, Красный пр-т, 86, офис 501
Тел.: (383) 358 54 21, 227 62 54
Тел./факс: (383) 227 62 53

Пермь

614010, Комсомольский пр-т, 98, офис 11
Тел./факс: (342) 290 26 11 / 13 / 15

Ростов-на-Дону

344002, ул. Социалистическая, д. 74, литер А
Тел.: (863) 200 17 22, 200 17 23

Самара

443096, ул. Коммунистическая, 27
Тел./факс: (846) 266 50 08, 266 41 41, 266 41 11

Санкт-Петербург

198103, ул. Циолковского, 9, корпус 2 А
Тел.: (812) 320 64 64
Факс: (812) 320 64 63

Сочи

354008, ул. Виноградная, д. 20 А, офис 54

Уфа

450064, ул. Мира, 14, офисы 518, 520
Тел.: (347) 279 98 29
Факс: (347) 279 98 30

Хабаровск

680011, ул. Металлистов, 10, офис 4
Тел.: (4212) 78 33 37
Факс: (4212) 78 33 38

Туркменистан

Ашгабат

744017, Мир 2/1, ул. Ю. Эмре, «Э.М.Б.Ц.»
Тел.: (99312) 45 49 40
Факс: (99312) 45 49 56

Узбекистан

Ташкент

100000, ул. Пушкина, 75
Тел.: (99871) 140 11 33
Факс: (99871) 140 11 99

Украина

Днепропетровск

49000, ул. Глинка, 17, 4 этаж
Тел.: (380567) 90 08 88
Факс: (380567) 90 09 99

Донецк

83023, ул. Лабутенко, 8
Тел./факс: (38062) 345 10 85, 345 10 86

Киев

04070, ул. Набережно-Крещатицкая, 10 А, кор. Б
Тел.: (38044) 490 62 10
Факс: (38044) 490 62 11

Львов

79015, ул. Тургенева, 72, к. 1
Тел./факс: (032) 298 85 85

Николаев

54030, ул. Никольская, 25
Бизнес-центр «Александровский», офис 5
Тел./факс: (380512) 48 95 98

Одесса

65079, ул. Куликово поле, 1, офис 213
Тел./факс: (38048) 728 65 55

Симферополь

95013, ул. Севастопольская, 43/2, офис 11
Тел./факс: (380652) 44 38 26

Харьков

61070, ул. Ак. Проскуры, 1
Бизнес-центр «Telesens», офис 569
Тел.: (380577) 19 07 49
Факс: (380577) 19 07 79



ЦЕНТР ПОДДЕРЖКИ КЛИЕНТОВ

Тел.: 8 (800) 200 64 46 (многоканальный)
(495) 797 32 32
Факс: (495) 797 40 02
ru.csc@ru.schneider-electric.com
www.schneider-electric.ru