

УДК 621.3

Балябин Алексей Александрович,
студент-магистрант,
Забайкальский Государственный Университет,
г. Чита

**НЕГАТИВНОЕ ВЛИЯНИЕ
ГАРМОНИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ
THE NEGATIVE IMPACT OF THE HARMONIC COMPONENT
IN ELECTRICAL NETWORKS**

Аннотация: Гармоническая составляющая в электросетях является важной проблемой в связи с использованием более чувствительной аппаратуры. Гармоники влияют на точность работы схем управления, ложные срабатывания выключателей, износ изоляции проводки. Таким образом, исследования по этой теме являются важными. Нужно чёткое понимание негативных факторов и степени их влияния на оборудование для понимания проблемы.

Abstract: The harmonic component in power grids is an important problem due to the use of more sensitive equipment. Harmonics affect the accuracy of control circuits, false alarms of switches, and wear of wiring insulation. Therefore, research on this topic is important. A clear understanding of the negative factors and the extent of their impact on the equipment is needed to understand the problem.

Ключевые слова: гармоники, влияние.

Keywords: harmonics, influence.

В наше время проектировщик электрических сетей ставит перед собой задачу разработки, адаптации систем в связи с возрастающим уровнем гармоник. Ситуация в будущем будет лишь усложняться из-за роста использования чувствительной электроники и повышения нагрузки. Промышленность, машиностроение, заводы и фабрики оказывают всё большее влияние на электрические сети.

Влияние высших гармонических составляющих на оборудование

Влияние на трансформаторы

Силовые трансформаторы – это основное оборудование генерирующих и распределительных предприятий, в связи с чем к их техническому состоянию уделяется большое внимание и контроль. Высшие гармоники же оказывают большое влияние на изоляцию и техническую, экономическую эффективность их эксплуатации.

В чём же причины искажения электрического сигнала? Искажения связаны с совместной работой электроприемника и электрической сети. Появление несинусоидального сигнала обусловлена присоединением со стороны нагрузки нелинейных потребителей, например: Дуговые печи, сварочные аппараты, выпрямители, люминесцентные, газоразрядные осветительные приборы, бытовые устройства, потребляющие выпрямленный ток.

Однако, не только потребитель, но и работа промышленного оборудования с нелинейной вольт-амперной характеристикой связана с нелинейной нагрузкой. Трансформаторы в режиме насыщения, диодные мосты, частотные преобразователи мощности, промышленные выпрямители и подобное оборудование.

Какое же негативное влияние мы наблюдаем от гармонической составляющей рассматривая трансформаторы:

- Ускорение износа изоляции трансформаторного оборудования под действием нагрева;
- Потери мощности;
- Возрастание помех в системах телекоммуникаций;
- Срок службы конденсаторных установок сокращается, усложняется компенсация реактивной мощности с помощью батарей силовых конденсаторов;



- Непреднамеренное срабатывание предохранителей и выключателей, реагирующих на температуру узлов, находящихся под их контролем;
- Ухудшается работа устройств РЗА.

Следует объяснить, как происходит износ силового оборудования. Мощность трансформатора определяется во время проектирования и заключена на расчётной нагрузке и экономических интервалах нагрузки:

$$S_{\text{эк. min}} \leq \frac{S_{\text{п}}}{N} \leq S_{\text{эк. max}} \quad (1)$$

где $S_{\text{эк. min}}$ и $S_{\text{эк. max}}$ – минимальная и максимальная границы экономического интервала нагрузки трансформатора принятой номинальной мощности, в зависимости от зоны сооружения подстанции и вида нагрузки потребителей;

$S_{\text{п}}$ – нагрузка на шинах подстанции, кВА;

N – количество трансформаторов.

Формула расчётной полной мощности состоит из активной и реактивной мощностей основной промышленной частоты:

$$S_{\text{полн}} = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2)$$

Где P – активная мощность, кВт, при 50 Гц;

Q – реактивная мощность, кВАр, при 50 Гц.

Исходя из выше написанного можно сделать вывод, что полная мощность при влиянии нелинейных нагрузок будет значительно отличаться от проектной, из-за чего трансформатор будет работать в режиме перегрузки. Чем больше будет нарушаться состояние изоляции, тем больше будет диэлектрических потерь, что в итоге приведет к снижению срока службы оборудования.

В проведенном исследовании по оценке технических потерь были сделаны следующие выводы. Годовые суммарные технические потери электроэнергии от общего потребления составляют 14%, из них 5% дополнительные потери от несинусоидальности и несимметрии. Потери активной мощности от несинусоидального режима 50% от тепловых потерь в трансформаторе ТМГ-6/0,4 кВ, мощностью 630 кВА. А уровень перегрева элемента система электроснабжения при действии на него гармонических составляющих составляет 3,2-10,4 С, что может привести к тому, что срок службы элемента будет уменьшен более чем в два раза, так как принято считать долгую работу в условиях превышения температуры на 10 С в два раза снижающей срок службы изоляции.

Уменьшения влияния гармонических составляющих на силовое и кабельное оборудование можно добиться, используя аппаратные и схемные решения. Схемные решения можно использовать ещё на этапе разработки и вводе в эксплуатацию электроэнергетической системы.

Потери активной мощности от токов высших гармоник в трансформаторах выражаются формулой:

$$\Delta P_{I_v} = 3 \sum_{v=2}^n I_v^2 R_{k1} k_{vm} \quad (3)$$

Где I_v – ток v -й гармоники, гармоники, проходящей через трансформатор;

R_{k1} – сопротивление короткого замыкания трансформатора на основной частоте;

k_{vm} – коэффициент учитывающий увеличение сопротивления короткого замыкания для высших гармоник вследствие влияния поверхностного эффекта и эффекта близости. Для силовых трансформаторов можно принять $k_{5m} = 2,1$; $k_{7m} = 2,5$; $k_{11m} = 3,2$; $k_{13m} = 3,7$.

Дополнительные потери х.х., обусловленные высшими гармониками, можно определить по выражению:

$$\Delta P_{x.xv} = \Delta P_{x.x} \sum_{v=2}^n \left(\frac{U_v}{U_{\text{ном}}} \right)^2 \quad (4)$$

Дополнительные потери к.з., вызванные несинусоидальностью напряжения:

$$\Delta P_{\text{к.з}v} = 0,607 \frac{\Delta P_{\text{к.з.}}}{U_{\text{к.з.}}^2} \sum_{v=2}^n \left(\frac{U_v}{U_{\text{ном}}} \right)^2 \frac{1}{v\sqrt{v}} \quad (5)$$

Добавочные потери, обусловленные вихревыми токами. Величина этих потерь в обмотках трансформатора возрастает пропорционально квадрату номера гармоники:



$$\Delta P_{добv} = v^2 0,05 \Delta P_{к.зv} \quad (6)$$

Таким образом, суммарные дополнительные потери, обусловленные несинусоидальным режимом работы трансформатора, определяются в виде:

$$\Delta P_{lv} = \Delta P_{x.x} \sum_{v=2}^n \left(\frac{U_v}{U_{ном}} \right)^2 + 0,607 \frac{\Delta P_{к.з}}{u_{к.з}^2} \sum_{v=2}^n \frac{1+0,05v^2}{v\sqrt{v}} \left(\frac{U_v}{U_{ном}} \right)^2 \quad (7)$$

Влияние на асинхронные двигатели

Влияние высшей гармонической составляющей относительно асинхронных двигателей заключается в изменении механических характеристик и вызывании дополнительных потерь.

Дополнительные потери для АД, обусловленные несинусоидальностью, определяются:

$$\Delta P_{lv} = \Delta P_{м1 ном} I_{\Pi}^2 \sum_{v=2}^n \left(\frac{U_v}{U_{ном}} \right)^2 * \left(\frac{\sqrt{v} + \sqrt{v \pm 1}}{v^2} \right) \quad (8)$$

Где $\Delta P_{м1 ном}$ – потери в меди статора при номинальном токе основной частоты;

Знак «+» под знаком корня соответствует симметричным составляющим гармоник, создающим поля вращения, встречные полю основной гармонике, а знак – попутные.

Для расчёта систем электроснабжения с большим количеством асинхронных двигателей формулу можно упростить. Коэффициент, учитывающий параметры асинхронного двигателя, обозначим $k_{АД}$:

$$k_{АД} = \frac{\Delta P_{м1 ном} I_{\Pi}^2}{P_{ном}} \quad (9)$$

Где $P_{ном}$ – номинальная активная мощность двигателя

Зная, что $\Delta P_{м1 ном} = m_1 I_1^2 R_1$

$$I_1 = \frac{P_{ном}}{\sqrt{3} \eta \cos \varphi U_{ном}} \quad (10)$$

Где m_1 – число фаз;

R_1 – активное сопротивление статорной обмотки, на основной частоте Ом;

η – КПД двигателя;

$\cos \varphi$ – номинальный коэффициент мощности.

В результате получаем:

$$\Delta P_{lv} = k_{АД} P_{ном} \sum_{v=2}^n \left(\frac{U_v}{U_{ном}} \right)^2 \left(\frac{\sqrt{v} + \sqrt{v \pm 1}}{v^2} \right) \quad (11)$$

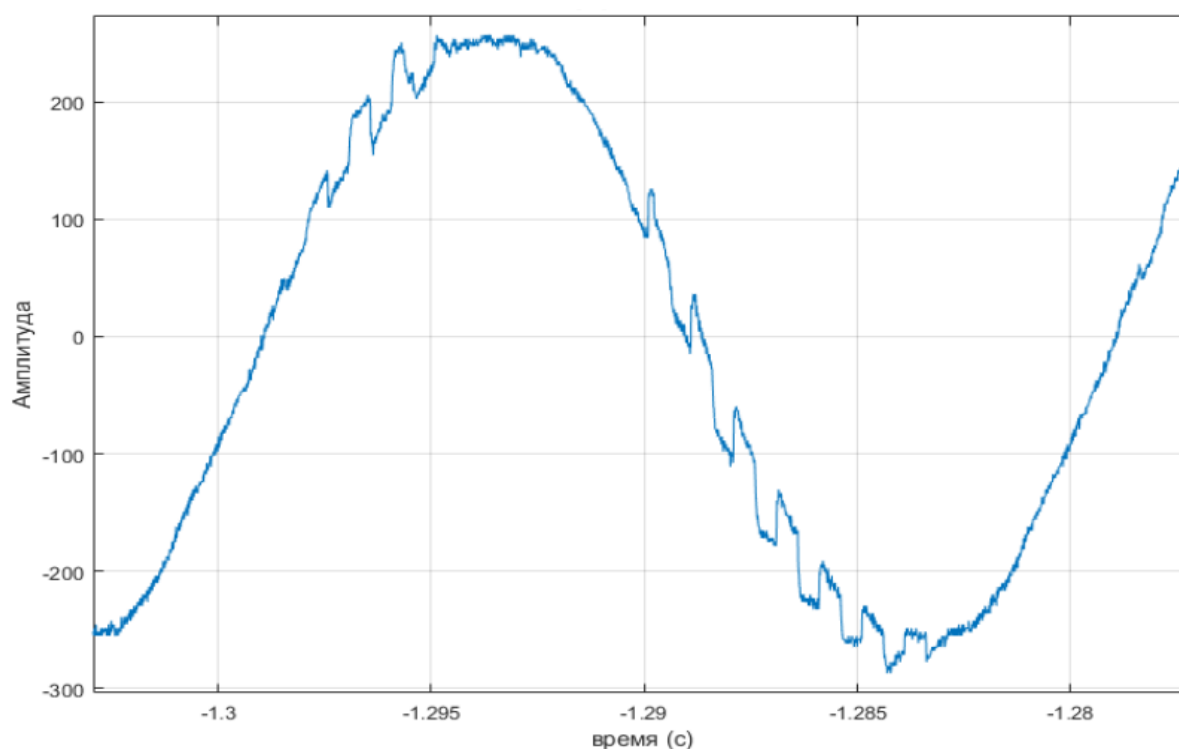


Рис.1 Синусоида, испорченная высшей гармоникой

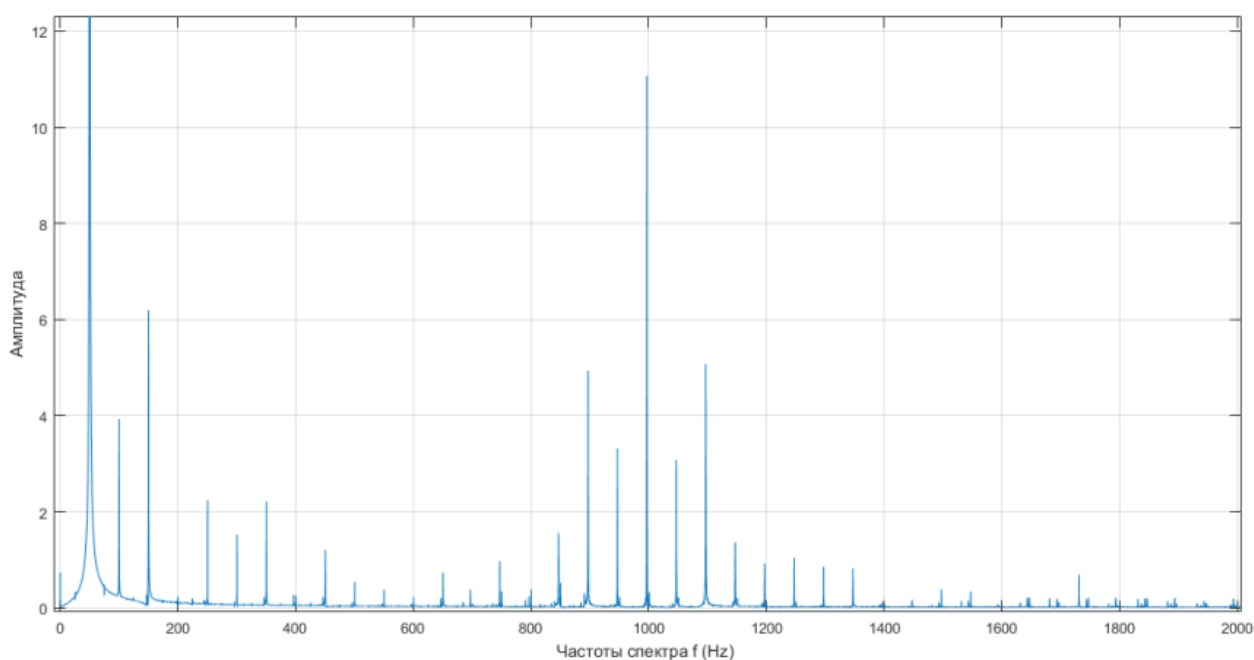


Рис.2 Спектр при влиянии высшей гармоники

Принято считать, что механические характеристики, а именно коэффициент мощности и вращающийся момент даже при увеличении коэффициента искажения формы кривой напряжения до 15% изменяются незначительно, однако распределение потерь в асинхронном двигателе при этом следующее: обмотка статора – 14%; цепь ротора – 41%; торцевые зоны – 19%; ассиметричные пульсации – 26%.

Влияние высшей гармонической составляющей на механические характеристики заключается в появлении на статоре движущих сил, которые создают на валу вращающие моменты в направлении вращения ротора или же в обратном направлении, что зависит от порядка гармоники. От чего можно сделать вывод, что величина результирующего момента, при определенном значении скольжения двигателя может оказаться ниже статического момента, то есть сопротивления приводного механизма двигателя.

При работе асинхронного двигателя 4A112M4УЗ с высшими гармоническими составляющими 3-го, 5-го, 7-го порядка было зафиксировано, что ни момент, ни частота вращения не устанавливались на параметрах естественной статической характеристики и наблюдался постоянный колебательный процесс. Высшая гармоническая составляющая в зависимости от порядка создает асинхронный вращающийся момент и результирующий асинхронный вращающийся момент. Что значит, что ротор двигателя либо затормаживается (двигательный режим), либо ускоряется (генераторный режим).

При пуске асинхронного двигателя опасным является действие прямых гармоник поля, а при торможении обратных.

Сильную опасность моменты от высших гармоник вызывают в случае короткозамкнутых обмотках ротора, так как в этом случае для токов высших гармоник поля создаются короткие цепи, состоящие из соседних или близлежащих стержней и участков колец и обладающих весьма малым сопротивлением.

Из всего перечисленного можно сделать вывод, что при наличии высших гармонических составляющих приводит к незатухающим колебательным процессам момента на валу, частоты вращения, а также к вибрации двигателя. Возможно наступление устойчивого режима работы при большом скольжении и малой частоте вращения в процессе пуска, приводящее к перегреву.

Всё перечисленное приводит к быстрому износу асинхронного электродвигателя, что увеличивает затраты излишним обслуживанием, ремонтом, заменой оборудования.

Влияние на воздушные линии

Линии электропередачи (ЛЭП) при влиянии высших гармонических составляющих имеют дополнительные потери активной мощности, рассчитываемые по следующей формуле:

$$\Delta P_{\Sigma v} = 3 \sum_{v=2}^n I_v^2 R_1 k_{rv} \quad (12)$$

Где v – номер гармоники;

n – число учитываемых гармоник;

I_v – ток v -ой гармоники;

R_1 – активное сопротивление линии на основной частоте;

k_{rv} – коэффициент, учитывающий влияние поверхностного эффекта, как правило, его принимают равным: $k_{rv} = 0,47\sqrt{v}$.

Удельное активное сопротивление проводника на частоте v -ой гармоники равно:

$$r_{0v} = r_0 * (k_{pv} + k_{bv}) \quad (13)$$

Где r_0 – удельное сопротивление проводника постоянному току (с учетом температуры);

k_{pv} – коэффициент, учитывающий явление поверхностного эффекта для v -ой гармоники, и равный $k_{pv} = 0,021\sqrt{f}$ – для меди и $k_{pv} = 0,01635\sqrt{f}$ – для алюминия.

k_{bv} – коэффициент, учитывающий эффект близости для v -ой гармоники и определяется:

$$k_{bv} = \frac{1,18 + k_{pv}}{k_{pv} + 0,27} * \left(\frac{d}{a}\right)^2 \quad (14)$$

Где d – диаметр жилы проводника, мм;

a – расстояние между центрами жил, мм.

Коэффициент близости нужно обязательно учитывать для кабельных линий. Для воздушных линий, если $a > 50$ мм, эффект близости предлагается не учитывать. Таким образом выражение для расчета потерь от высших гармоник в ЛЭП примет вид:

$$\Delta P_{lv} = 3r_0 l \sum_{v=2}^n I_v^2 * (k_{pv} + k_{bv}) \quad (15)$$

Также на воздушных линиях под влиянием гармонической составляющей уменьшается проводимость и увеличивается величина нагрева проводников.

Влияние на батареи конденсаторов и фильтрокомпенсирующие устройства

При несинусоидальном напряжении на зажимах батареи конденсаторов в диэлектрике появляются активные потери, которые вызваны высшими гармониками в соответствии с формулой:

$$\Delta P_{I_{\text{диэл}}} = \omega \sum_{v=2}^n U_v^2 v \operatorname{tg} \delta_v C \quad (16)$$

Где U_v – напряжение v -ой гармоники;

C – электрическая емкость конденсаторной установки;

ω – угловая частота;

$\operatorname{tg} \delta_v$ – тангенс угла потерь диэлектрика на v -ой гармоники.

Тангенс при частоте до 1000 Гц принимается равным номинальному значению для типа диэлектрика. От 1000 до 3000 возрастает в 1,5 раза. Емкость конденсатора при частоте до 3000 Гц принимается $C_v = C_{\text{ном}} = \text{const}$. От чего формула приобретает следующий вид:

$$\Delta P_{I_{\text{диэл}}} = \omega C_{\text{ном}} \operatorname{tg} \delta_{\text{ном}} \left(\sum_{v=2}^{20} U_v^2 v + \sum_{v=21}^{40} U_v^2 v \right) \quad (17)$$

Потери в реакторах:

$$\Delta P_{lm} = 3 \sum_{v=2}^n I_v^2 R_1 k_{rv} \quad (18)$$

Где I_v – ток v -ой гармоники, в реакторе;

R_1 – активное сопротивление на основной частоте;

k_{rv} – коэффициент изменения активного сопротивления на частоте v -ой гармоники.

Дополнительные потери в LC фильтре:

$$\Delta P_{flv} = 3 \sum_{v=2}^n I_{vk}^2 X_{pk} (v_k \tan \delta + \sqrt{v_k} \cot \varphi_{pk}) \quad (19)$$

Где I_{vk} – ток v -ой гармоники, проходящей через фильтр;

$X_{pk}\sqrt{v}$ – активное сопротивление реактора для v -ой гармоники, взятое в предположении резкого проявления поверхностного эффекта: $\cot \varphi_{pk} = \frac{R_p}{X_p}$



Влияние на устройства РЗА

Устройства РЗ и А осуществляют непрерывный контроль за состоянием всех элементов энергосистемы. Однако все установки контроля заключены за нормальной синусоидальной формой кривых тока и напряжения, в связи с чем негативное влияние гармонической составляющей на синусоиду может вызвать ложное срабатывание устройств защиты, что приведет к аварийным режимам и нарушению стабильности всей энергосистемы.

Соответственно действие высших гармоник на системы релейной защиты и автоматики следующее:

- Снижение срока эксплуатации РЗ и А;
- Нарушаются установки срабатывания по току и напряжению;
- Возникают ложные срабатывания вследствие действия отдельных гармоник.

Видами ошибочного срабатывания в основном являются отключения двигателя при пуске. Так как происходит резкое увеличение в пусковом токе высших гармонических составляющих, что сбивает установки реле тока.

При рассматривании в качестве примера срабатывания при пуске двигателя токовой отсечки, защищающей линию с синхронным электродвигателем 6 кВ, было определено, что масляный выключатель отключился и остановил пуск двигателя. Мощность двигателя 240 кВт, расчетная уставка отсечки – 260 А. Защита была выполнена на реле типа РТ-80, у которого погрешность тока срабатывания составляет 5%. С учетом погрешности реле срабатывания защиты на данной уставке может произойти от 247 до 273 А. Действующее значение же не превышало 240 А. Но из-за влияния гармонических составляющих тока (в основе второй гармоники 41%) реле подало сигнал на отключение.

Способы уменьшения влияния высших гармоник на работу оборудования

К основным способам избавления от пагубного влияния гармоник относят:

- Фильтро-компенсирующие устройства;
- Антигармонические реакторы;
- Активные и пассивные фильтры;
- Рациональное построение схемы электроснабжения;
- Линейные дроссели;
- Гибридные фильтры;
- Специальные разделительные трансформаторы;
- Магнитные синтезаторы.
- Активные кондиционеры гармоник

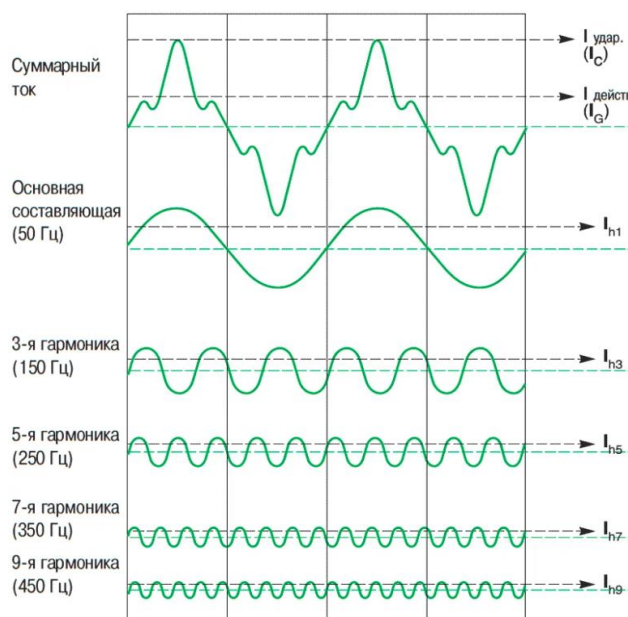


Рис3. Результат наложения гармоник на основную частоту без сглаживания фильтрами

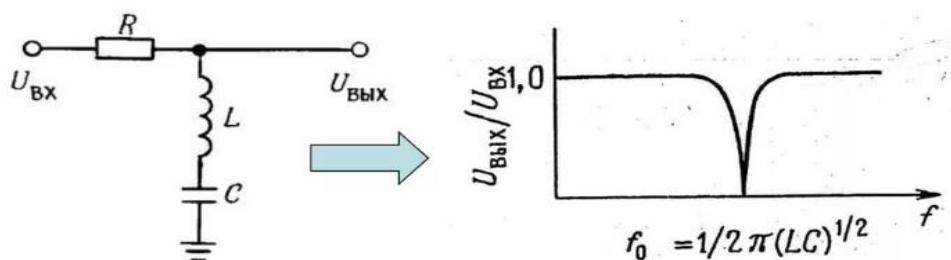


ФКУ или силовые фильтры гармоник – это тип конденсаторных установок чья задача – это фильтрация гармоник и компенсация реактивной мощности. Такие устройства нужны на предприятиях тяжелого машиностроения или перерабатывающих производствах, на которых применяются дуговые плавильные печи, электролитические ванны высокого напряжения и другое энергоемкое оборудование нелинейного характера потребления электроэнергии. Можно сказать, что работа подобного оборудования запрещается без использования ФКУ.

Главная цель использования ФКУ – это уменьшение реактивного сопротивления LC – цепочек до значений близких к нулю и шунтирование главной электрической сети на частоте заданной гармоники.

Представляют они из себя LC или RLC цепочки, настроенные на резонанс с определенной гармоникой, которая обозначается заказчиком, либо результатами замеров.

Такой фильтр буквально вырезает из сигнала участок с определённой частотой.



Антигармонический реактор – используется для защиты КУ от перенапряжений, которые обусловлены резонансными явлениями на разных гармонических частотах.

Реактор ограничивает амплитуду тока высшей гармонической составляющей, протекающей в LC ветви, обеспечивая защиту КУ, однако большая часть токов высшей гармонической составляющей протекает по сети, хоть и минуя КУ.

Важно учитывать, что при использовании антигармонических реакторов могут возникать аварийные режимы и неустойчивость работы системы электроснабжения.

Пассивный фильтр – используются для ограничения уровня высших гармонических составляющих ток и напряжения до фиксированного уровня, соответствующего стандарту.

Фильтр настраивается на определенную частоту высшей гармонической составляющей напряжения или тока. На частоте, которую нужно ограничить фильтр имеет минимальное сопротивление, равное активному сопротивлению реактора, в связи с чем потребляет почти все генерируемые токи высшей гармонической составляющей заданной частоты.

Активный фильтр – отличается присутствием одного или нескольких активных компонентов, таких как, транзистор или операционный усилитель.

В активном фильтре используется принцип отделения элементов фильтра от остальных электронных компонентов схемы. Применение усилителей в активных фильтрах позволяет увеличить наклон частотной характеристики в полосе подавления, что недостижимо при каскадном соединении пассивных цепочек.

Активные фильтры подразделяются на:

- Фильтры высоких и низких частот;
- Полосовой фильтр;
- Режекторный фильтр.

Фильтры высоких и низких частот – ослабляют амплитуду гармонической составляющей ниже/выше частоты среза.

Полосовой фильтр – ослабляет амплитуды выше и ниже некоторой полосы.

Режекторный фильтр – ослабляет амплитуды в определённой ограниченной полосе частот.

Относительно **рационального построения схемы**, распространенными средствами является использование трансформаторов преобразователей с повышенным напряжением 110-330кВ, питание нелинейной нагрузки от отдельного трансформатора, параллельное подключение синхронных и асинхронных электродвигателей нелинейным нагрузкам.

Линейные дроссели имеют малое индуктивное сопротивление на частоте 50 Гц, но значительное сопротивление на частотах высших гармоник, в связи с чем подавляет их.

Гибридные фильтры представляют из себя сочетание активного и пассивного фильтров. Преимущества такого фильтра, следующие:

- Уменьшается установленная мощность силовой части активного фильтра, что удешевляет установку;
- В сравнении с использованием только пассивного фильтра повышается эффективность компенсации нелинейных искажений при изменении характеристики нелинейной нагрузки;
- Уменьшается негативное влияние вариации параметров пассивного фильтра на характеристики ФКУ.

Разделительный трансформатор – применяют с обмоткой «Треугольник-Звезда», что позволяет избавляться от гармоник кратных третьей, при сбалансированной нагрузке.

Магнитные синтезаторы – обеспечивают защиту от различных искажений напряжения питания, как от провалов и импульсов напряжения, импульсных и высокочастотных помех, так и от наличия высших гармоник, которые вызывают искажение синусоидальной формы входного напряжения.

Активный кондиционер гармоник (АКГ) – используется, основываясь на анализе гармоник тока нелинейной нагрузки и генерировании в сеть таких же гармоник, но с противоположной фазой. Результатом служит нейтрализация гармоник в точке подключения АКГ.

В заключение всему выше сказанному, можно добавить, что в настоящее время количество средств и способов избавления от гармонических составляющих в сети, которые негативно влияют на оборудование, как промышленное, генерирующее так и бытовое, растёт с каждым годом. Но и требования к качеству электроэнергии также увеличиваются в связи с усложнением схем устройств, дорожанием оборудования, использованием микропроцессоров и требованием к точности измерений и стабильности работы. Всё это стимулирует к постоянному наблюдению за влиянием высших гармоник и силе их содержания в электрических сетях.

Список литературы:

1. Оценка дополнительных потерь мощности от высших гармоник в элементах систем электроснабжения:/ А.Г. Лютаревич, А.А. Вырва, С.Ю. Долингер, Д.С. Осипов, И.Н. Четверик // Омский научный вестник. – 2009. – №1. – С.109-113.
2. Влияние высших гармонических составляющих на работу асинхронных двигателей:/ Г.А. Немцев, Е.А. Селезнев, Л.А. Шестакова // Вестник Чувашского университета. – 2014. – №2. – С. 46-52.
3. Способы уменьшения влияния высших гармоник на работу электрооборудования:/ Я.Э. Шклярский, А.Н. Скамьин // Записки горного института. – 2011. – С. 121-124.
4. Исследование влияния высших гармонических составляющих на нагрев трансформатора:/ А.Т. Савельева // Вестник науки. – 2023. – №5. – С. 667-672.
5. Параметры теплового режима асинхронного электродвигателя для прогнозирования остаточного ресурса работы:/ О.И. Хомутов, С.О. Хомутов, В.И. Сташко, А.А. Грибанов // Ползуновский вестник. – 2004. – №1. – С. 279-284.
6. Управление качеством электроэнергии:/ И.И. Карташев, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов, Ю.В. Шаров, Р.Р. Насыров // Издательский дом МЭИ. – 2017.
7. Оценка технических потерь от высших гармоник в цеховой системе электроснабжения:/ А.В. Сапрыка, С.В. Хворостенко // Юность и Знания – Гарантия Успеха. – 2019. – С.133-138.
8. Вопросы теории и расчета трансформаторов:/ С.Б. Васютинский // Энергия. – 1970. – С.432
9. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий:/ И.В. Жежеленко // Энергоатомиздат. – 2000. – С.192



10. Исследование электрической сети Братского алюминиевого завода, анализ гармонических составляющих, выработка технического задания по улучшению качества электроэнергии:/ И.И. Карташев // 2000.
11. Силовые электрические конденсаторы:/ Г.С. Кучинский, Н.И. Назаров, Г.Т. Назарова, И.Ф. Переселенцев // Энергия. – 1975. – С.248
12. Потери на вихревые токи в обмотках трансформаторов при несинусоидальном токе:/ Э.А. Манькин // Электричество. – 1975. – №12. – С.48-52
13. Методика расчета дополнительных потерь активных мощности и электроэнергии в элементах систем электроснабжения промышленности предприятий, обусловленные высшими гармониками:/ П.И. Семичевский // Диссертация. – 1978. – С.206
14. Исследование влияния несимметрии и несинусоидальности напряжения на работу асинхронных двигателей:/ А.Л. Церазов, Н.И. Якименко // Госэнергоиздат. – 1963. – С.120
15. Повышение качества энергии в электрических сетях:/ А.К. Шидловский, В.Г. Кузнецов // Научдумка. – 1985. – С.268
16. Электроснабжение предприятий:/ Б.Н. Абрамович, Ю.Л. Жуковский, Ю.А. Сычев, Д.А. Устинов // Учебное пособие. – 2015.
17. Высшие гармоники и основные способы их уменьшения в системах электроснабжения:/ П.В. Разумчик // Актуальные проблемы энергетики. – 2013. – №65. – С.246-249
18. Анализ влияния высших гармоник в электрических сетях промышленных предприятий на работу систем релейной защиты и автоматики:/ М.Г. Баширов, В.Н. Шикунов // Проблемы энергетики. – 2006. – №11-12. – С.41-44

