

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 631.3

В.А. Тихомиров, В.Г. Титов, С.В. Хватов

ТЕХНИЧЕСКИЕ И ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ РЕГУЛИРУЕМЫХ ПРИВОДОВ ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
ООО «Экологические технологии», г. Балахна

Для двух самых распространенных типов современного регулируемого привода постоянного и переменного тока исследованы негативные последствия от циркуляции в питающей сети реактивной мощности и мощности искажения, выполнен анализ уровня потерь мощности и их стоимости. Даны рекомендации по компенсации реактивной мощности и мощности искажения. Материал рассмотрен на примере многолетней эксплуатации полупроводниковых приводов буммашины на одном из предприятий г. Балахны.

Ключевые слова: электропривод постоянного тока, электропривод переменного тока, реактивная мощность, $\cos\varphi$, высшие гармоники, мощность искажения, компенсация реактивной мощности, компенсация мощности искажения.

Электроустановки, потребляют как активную P , так и реактивную мощность первой гармоники тока Q и мощность искажения T . Все эти мощности являются составляющими полной мощности S . Активная составляющая обусловлена только первой гармоникой тока, идет на создание полезной работы и связана с преобразованием электрической энергии в другие виды энергии (механическую, тепловую, световую и др.). В отличие от активной мощности, полезно используемой в работе, реактивная мощность не выполняет полезной работы, она служит лишь для создания магнитных полей в индуктивных приемниках (например, в электродвигателях, трансформаторах и т. п.), циркулируя все время между источником электроэнергии и приемниками. Мощность искажения T обусловлена нелинейностью нагрузки и потреблением оборудованием из сети токов высших гармоник. Мощности Q и T , протекая по элементам электрической сети, вызывают в них дополнительные потери мощности ΔP . Мощность T может также вызвать искажение напряжения. Кроме того, перетоки этих мощностей снижают пропускную способность линий электропередач и трансформаторов, вынуждают увеличивать сечение кабельных линий и выполнять замену трансформаторов на большую номинальную мощность.

В предлагаемой работе показано, что реактивная мощность с помощью специальных устройств может генерироваться непосредственно у потребителя, не загружая при этом первичные генераторы электроэнергии, линии электропередач и трансформаторные подстанции. При этом можно говорить о компенсации реактивной мощности.

В настоящее время достаточно широко применяется регулируемый электропривод постоянного и переменного тока с различными типами полупроводниковых преобразователей. Кроме первой гармоники, сетевой ток преобразователей содержит высшие гармоники, т.е. в сети имеется мощность искажения T , которая, как и реактивная мощность Q , не выполняет полезной работы. С помощью специальных устройств она также может быть скомпенсирована.

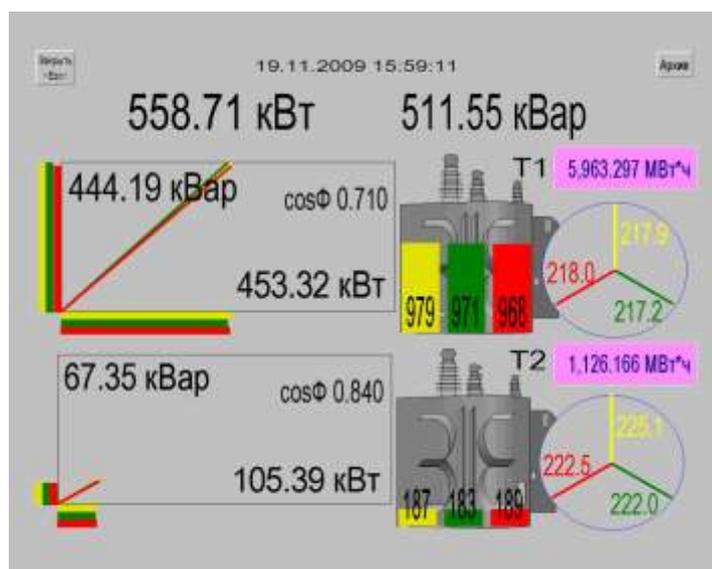


Рис. 1. Скриншот энергетических параметров SCADA-системы на машине по производству бумаги

Основным показателем уровня активной мощности Q в сети является $\cos\phi$ электроустановки. Связь полной мощности $S = U \cdot I$ (здесь U и I – действующие значения напряжения и тока) с активной мощностью P и реактивной Q выражается следующими соотношениями: $P = S \cdot \cos\phi = U \cdot I \cdot \cos\phi$; $Q = S \cdot \sin\phi = U \cdot I \cdot \sin\phi$. Для трехфазной сети $S = \sqrt{3} \cdot U_{\text{л}} \cdot I$, $P = S \cdot \cos\phi$, $Q = S \cdot \sin\phi$, где $U_{\text{л}}$, I – линейное напряжение и фазный ток.

Пусть, например, $\cos\phi_{\text{н}} = 0,92$ ($\phi = 23^\circ$ эл). Если принять относительное значение $S = 1$, тогда $P = 0,92 \cong S$; $Q = 0,39$. При $\cos\phi = 0,707 = \sqrt{2}/2$ ($\phi = 45^\circ$ эл) будем иметь $P = 0,707$; $Q = 0,707$. То есть, если $\cos\phi$ снижается до значения $\cos\phi = 0,707$, то при этом уменьшается

резерв полной мощности S за счет передачи реактивной мощности Q . Если бы из сети потреблялась чисто активная мощность $P = 0,707$, то был бы резерв $S - P \approx 0,3$, т.е. 30%.

На рис. 1 приведен скриншот энергетических параметров SCADA-системы на машине по производству бумаги из мукулатуры на одном из предприятий Нижегородской области.

Приводы буммашины питаются от 2-х трансформаторов мощностью по 1000 кВА каждый. К 1-му трансформатору подключены все регулируемые приводы буммашины, выполненные по системе тиристорный преобразователь – двигатель постоянного тока. К 2-му трансформатору подключены только нерегулируемые асинхронные двигатели. рис. 1 видно, что 1-й трансформатор нагружен реактивной мощностью $Q = 444,19$ кВар, почти равной активной мощности $P = 453,32$ кВт, поэтому $\cos\phi = 0,710$, что является очень низким значением. Это объясняется тем, что по технологическим причинам буммашина работает с пониженной линейной скоростью $V = 69,99$ м/мин, которая значительно ниже номинальной скорости $V_{\text{н}} = 120$ м/мин. Это достигается за счет увеличения угла управления тиристорных выпрямителей. Зарегулированный режим тиристорных выпрямителей в основном и определяет низкое значение $\cos\phi$ (см. рис. 1) и большое значение реактивной мощности.

Необходимо исключать сильное зарегулирование тиристорных выпрямителей, снижая скорость за счет редукторов, или применять электропривод переменного тока на основе преобразователей частоты с промежуточным неуправляемым звеном постоянного тока. Обоснование этих положений дается далее.

Если бы имели у привода буммашины $\cos\phi = 1$, то для передачи 500 кВт мощности по сети с напряжением $U_{\text{л}} = 400$ В потребовался бы фазный активный ток

$$I = P / 3U_{\phi} = P / 3U_{\text{л}} / \sqrt{3} = P / \sqrt{3}U_{\text{л}} = (500 \cdot 10^3) / (1,73 \cdot 400) = 722 \text{ А} .$$

При $\cos\phi = 0,707$ для передачи той же активной мощности 500 кВт к полученной выше величине тока, который является активным, будет еще добавляться реактивный ток. Полный ток при этом:

$$I = I_{\text{а}} / \cos\phi = 722 / 0,707 = 1021 \text{ А},$$

т.е. увеличивается в 1,41 раза. Следовательно, оборудование питающей сети (кабели, распределительные устройства, трансформаторы и генераторы) нагружено большим током. При этом увеличивается падение напряжения на элементах питающей сети, возрастают потери мощности.

Реактивный ток в этом случае:

$$I_p = I \cdot \sin\varphi = I \cdot \sqrt{1 - \cos^2\varphi} = 1021 \cdot \sqrt{1 - 0,707^2} = 1021 \cdot 0,707 = 722 \text{ А,}$$

т.е. равен активному I_a .

Оценим потери, которые будут существовать в случае рассмотренных примеров. Общие потери в трехфазном устройстве равны:

$$\Delta P = 3 \cdot I^2 R = 3(I_a^2 + I_p^2)R = \Delta P_a + \Delta P_p.$$

Пусть общие потери ΔP при $\cos\varphi = 1$ составляют 10% от установленной мощности S , то есть равны $0,1 \cdot S$. Это потери ΔP_a от активной (и единственной, так как $\cos\varphi = 1$) составляющей тока.

Найдем составляющие потерь ΔP_a и ΔP_p от протекания активной и реактивной составляющих тока при $\cos\varphi_H = 0,92$ и $\cos\varphi = 0,707$.

1) если $\cos\varphi_H = 0,92$, то полный ток равен: $I = I_a / \cos\varphi_H = I_a / 0,92 = 1,1 \cdot I_a$; реактивный ток: $I_p = \sqrt{I^2 - I_a^2} = \sqrt{(1,1 \cdot I_a)^2 - I_a^2} = I_a \cdot \sqrt{0,21} = 0,46 \cdot I_a$. Потери: $\Delta P = 3 \cdot I^2 R = 3 \cdot (1,1 \cdot I_a)^2 R = = 3 \cdot 1,21 \cdot \Delta P_a$, т.е. возрастают на 21%, но это все-таки мало по сравнению с ΔP_a ;

2) допустим, $\cos\varphi = 0,707$. Полный ток: $I = I_a / 0,707 = 1,41 I_a$. Потери от I_a останутся теми же, а общие потери равны: $\Delta P = 3 \cdot I^2 R = 3 \cdot (1,41 \cdot I_a)^2 R = 3 \cdot 2 \Delta P_a$, т.е. они возрастают в два раза и $\Delta P_a = \Delta P_p$.

Таким образом, увеличение общего тока – это увеличение падения напряжения питающей сети и возрастание нагрева электрооборудования. У асинхронных двигателей при этом увеличивается скольжение S , увеличиваются потери и нагрев, снижается производительность, кроме того, за потери электроэнергии приходится платить (как за потребляемую электроэнергию).

Рассмотрим некоторые особенности оплаты электроэнергии. В настоящее время 4-го числа каждого месяца Нижегородская сбытовая компания «Энергосбыт» [1] выставляет для потребителя при одноставочном тарифе при годовом числе часов использования заявленной мощности T_g от 5000 до 6000 ч/год две цены оплаты за электроэнергию (диапазон напряжений СН1 – 35 кВ) без учета НДС (на 23.11.2009):

- 1) регулируемая цена $\Pi_1 = 2,20$ руб./кВт·ч;
- 2) свободная (нерегулируемая) цена $\Pi_2 = 3,15$ руб./кВт·ч.

Значение Π_2 в течение 2009 г. колебалось в пределах от 2,37 руб./кВт·час в январе до 3,15 руб./кВт·ч в октябре. Среднее значение в течение 2009 г $\Pi_{2CP} = 2,76$ руб./кВт·ч. Данные сайта «Энергосбыт» для октября 2009 г.:

2.2. СН1

- Тм от 7000 часов и выше	2,00	2,93931
- Тм 6000-7000 часов	2,05	2,97112
- Тм 5000-6000 часов	2,20	3,14755

Принимаем, что на буммашине годовое время работы $T_g = 6000$ ч/год, а месячное $T_m = 500$ ч/мес.

Расчет месячной стоимости электроэнергии $C_{ЭМ}$ выполняется через коэффициент соотношения цен β по следующей формуле:

$$C_{ЭМ} = \beta \cdot \Pi_1 \cdot W_{PM} + (1 - \beta) \cdot \Pi_2 \cdot W_{PM}, \text{ руб./мес.},$$

где β – доля объема электрической энергии, поставляемой по регулируемым тарифам; W_{PM} – месячное потребление активной энергии.

На октябрь 2009 значение $\beta = 0,47745$:

β - Доля объема электрической энергии по регулируемым тарифам	0,47745
Доля объема электрической энергии по нерегулируемым ценам	0,52255

Доля β колеблется в течение года от месяца к месяцу в пределах от 0,698 (февраль 2009г) до 0,46 (август 2009 г.). Среднее значение в течение 2009 г. $\beta_{ср} = 0,579$.

Электрическая энергия сверх объемов, поставляемых потребителям по регулируемым тарифам, оплачивается по свободным (нерегулируемым) ценам в рамках предельных уровней нерегулируемых цен на розничных рынках.

Согласно скриншоту (рис. 1), общее потребление активной мощности от 1-го и 2-го трансформатора $P = 453,32 + 105,39 = 560$ кВт. Тогда месячное потребление активной энергии

$$W_{PM} = P \cdot T_m = (560 \cdot 500) \text{ кВт} \cdot \text{ч/мес.} = 280\,000 \text{ кВт} \cdot \text{ч/мес.},$$

а стоимость электроэнергии

$$C_{ЭМ} = 0,47745 \cdot 2,20 \cdot 280\,000 + (1 - 0,47745) \cdot 3,15 \cdot 280\,000 = 294\,109,2 + 460\,889,1 = \\ = \mathbf{754\,998,3 \text{ руб./мес.}}$$

Здесь принято $\beta = 0,47745$; $C_2 = 3,15$ руб./кВт·ч.

Если принять для этих величин средние значения $\beta_{ср} = 0,58$; $C_{2ср} = 2,76$ руб./кВт·ч, то получим $C_{ЭМ} = 0,58 \cdot 2,20 \cdot 280\,000 + (1 - 0,58) \cdot 2,76 \cdot 280\,000 = 357\,280 + 324\,576 = \\ = 681\,856 \text{ руб./мес.}$, что незначительно отличается от предыдущего значения.

Допустим, общие потери ΔP составляют 10% от потребляемой мощности $P_{вх}$. Это значит, что мы принимаем к.п.д установки $\eta = P_{вых} / P_{вх} = (P_{вх} - \Delta P) / P_{вх} = 0,9$ $P_{вх} / P_{вх} = 0,9$. Рассчитаем месячную стоимость потерь электроэнергии, которые создаются потребителями, подключенными только к 1-му трансформатору, имеющему очень низкий $\cos\phi = 0,71$ (см. рис. 1). Было показано, что при таком $\cos\phi$ полные потери $\Delta P = 3 \cdot I^2 R = 3 \cdot (1,41 \cdot I_a)^2 R = 3 \cdot 2 \Delta P_a$. Активные потери от нагрузок, подключенных к 1-му трансформатору:

$$\Delta P_a = 0,1 \cdot 453,32 = 45,33 \text{ кВт.}$$

Тогда общие потери от потребления активной и реактивной мощности:

$$\Delta P = 2 \cdot \Delta P_a = 90,66 \text{ кВт.}$$

Месячное потребление энергии, соответствующее этим потерям:

$$\Delta W_{PM} = (90,66 \cdot 500) \text{ кВт} \cdot \text{ч/мес.} = 45\,330 \text{ кВт} \cdot \text{ч/мес.}$$

Стоимость этих потерь:

$$\Delta C_{ЭМ} = 0,47745 \cdot 2,20 \cdot 45\,330 + (1 - 0,47745) \cdot 3,15 \cdot 45\,330 = 47\,614,18 + 74\,614,65 = \\ = \mathbf{122\,228,83 \text{ руб./мес.}}$$

По нашему мнению, это составляет очень существенную сумму в общей стоимости электроэнергии (16,2%). Причем половину этой суммы составляет стоимость потерь от циркуляции реактивной мощности и от этих затрат можно избавиться полностью. В случае применения регулируемого привода этого можно достигнуть за счет правильной технической политики без применения дополнительных устройств компенсации реактивной мощности.

Примечание: в этих расчетах еще не учтен НДС.

В следующем разделе приводится анализ влияния широко применяемых регулируемых приводов механизмов на составляющие полной мощности.

1. Регулируемый электропривод постоянного тока

Выпрямленное напряжение управляемого тиристорного преобразователя, который в настоящее время в основном применяется для питания двигателя постоянного тока, определяется следующим выражением: $U_d = U_{do} \cdot \cos \alpha$, где U_{do} – полное выпрямленное напряжение при $\alpha = 0$; α – угол управления.

Для двигателя постоянного тока $U_d \cong n$, где n – скорость электродвигателя. Величина n – это технологический параметр, определяющий производительность механизма.

Так как $\alpha \cong \varphi$ (см. рис. 2), то $U_d = U_{do} \cdot \cos \varphi$.

Без учета потерь в двигателе можно записать: $U_d \cdot I = P = U_{do} \cdot I \cdot \cos \varphi$, где $U_{do} \cdot I = S$ – полная мощность на валу двигателя постоянного тока при $\alpha = 0$ и $\cos \varphi = 1$, когда $U_d = U_{do}$; $n = n_H$, (когда мы не понижаем скорость двигателя, а работаем на полной (номинальной) скорости).

На рис. 2 приведены диаграммы сетевого напряжения фазы А u_A , тока фазы А i_A и первой гармоники этого тока $i_{A(1)}$ при угле управления $\alpha \approx 45^\circ$ град:

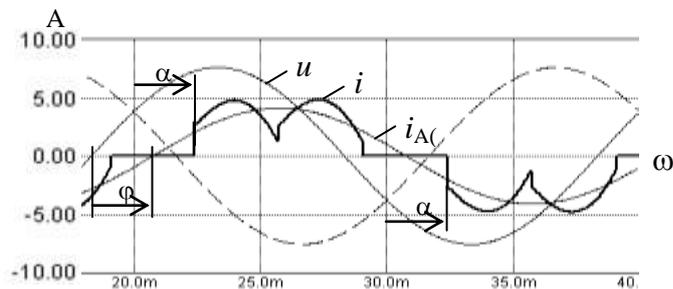


Рис. 2. Диаграммы сетевого фазного напряжения и тока управляемого выпрямителя

Здесь первая гармоника тока $i_{A(1)}$ сдвинута относительно напряжения u_A вправо на угол $\varphi \cong \alpha$, что говорит о наличии реактивной составляющей тока.

Допустим, скорость понизили на 30%, т.е. $U_d = 0,7 U_{do}$; $\cos \varphi = 0,7$. Тогда, как было показано ранее, $P = 0,7 \cdot S$, но при этом $Q = P = 0,7 \cdot S$.

Отметим, что $P = U_d \cdot I \cong n \cdot M = P_{\text{вал}}$, где M – момент на валу электродвигателя, $P_{\text{вал}}$ – мощность на валу.

Кроме первой гармоники, сетевой ток i_A содержит высшие гармоники. На диаграмме рис. 3 приведен гармонический состав сетевого тока i_A (рис. 2). Как видно из рис. 3, кроме первой гармоники сетевой ток содержит существенные по величине 5-ю (250 Гц) и 11-ю (550 Гц) гармоники.

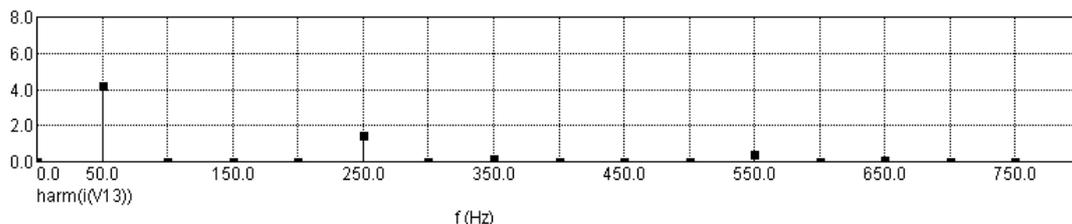


Рис. 3. Гармонический состав сетевого тока выпрямителя

В зависимости от режима выпрямления сетевой ток может содержать еще и 7-ю гармонику.

Наличие высших гармоник означает, что в сети имеется мощность искажения T , которая, как и реактивная мощность Q , не выполняет полезной работы, а нагружает сеть высшими гармониками тока. Рассмотрим понятие мощности искажения подробнее. Известно, что несинусоидальный ток можно представить в виде разложения на 1-ю гармонику и гармоники с более высокими частотами, кратными 1-й. Тогда действующее значение несинусоидального тока:

$$I = \sqrt{I_{(1)}^2 + \sum_{k=2} I_{(k)}^2},$$

где $I_{(1)}$ – действующее значение 1-й гармоники тока; $I_{(k)}$ – действующее значение k -й гармоники, начиная со второй.

Если умножить левую и правую часть последнего уравнения на напряжение U , то получим выражение для полной мощности S при наличии высших гармоник в токе:

$$S = U \cdot I = \sqrt{S_{(1)}^2 + T^2} = \sqrt{P^2 + Q^2 + T^2}.$$

Здесь $T = U \sqrt{\sum_{k=2} I_{(k)}^2}$ – мощность искажения, которая является составляющей полной мощности S при несинусоидальной форме тока; $\sqrt{\sum_{k=2} I_{(k)}^2} = I_{\Gamma}$ – действующее значение тока высших гармоник.

Общая характеристика двигателя, применяемого в приводе постоянного тока

1. Имеет единственное преимущество перед другими типами электродвигателей – хорошую управляемость и сравнительную простоту преобразователей для них.

2. Имеет ряд существенных недостатков:

- является самой сложной по конструкции, ненадежной и дорогой электрической машиной среди всех типов силовых электрических машин – имеет обмотку из меди на вращающейся части (на якоре) и коллектор в виде медных пластин со скользящим контактом в виде щеток, на станине расположены полюса возбуждения с обмоткой;
- щеточно-коллекторный узел подвержен износу и требует постоянного обслуживания, он также не очень хорошо переносит вибрации электродвигателя;
- имеется искрение щеточного контакта и поэтому двигатель невозможно применять во взрывоопасных средах;
- ограниченная скорость изменения тока якоря;
- необходимость двух источников питания: для якорной цепи и обмотки возбуждения, причем двигатель неработоспособен при исчезновении возбуждения;
- суровые климатические условия России также вызывают сомнения в перспективности широкого применения двигателя постоянного тока для регулируемого электропривода.

Выводы по электроприводу постоянного тока

1. Привод постоянного тока целесообразно применять для регулирования установившейся скорости в нешироких пределах ниже от номинальной. В динамических режимах (например, при пуске) углы могут изменяться в широких пределах.

2. Нецелесообразно использовать регулирование выпрямленного напряжения U_d для получения длительной работы на требуемой пониженной скорости. Необходимо применять редуктор для согласования скоростей двигателя и механизма.

3. В мощных приводах постоянного тока с управляемыми выпрямителями для снижения уровня реактивной мощности Q возможно применение специальных схем преобразо-

вателей и законов управления, например, поочередное управление двумя последовательными преобразователями, работающими на один якорь.

4. При работе преобразователей в сетевом токе всегда содержатся высшие гармоники, т.е. кроме активной и реактивной мощностей присутствует еще мощность искажений T , обусловленная несинусоидальностью сетевого тока. Высшие гармоники тока могут вызвать искажение сетевого напряжения. Мощность искажений T есть всегда и мало зависит от угла управления преобразователем. Она мешает компенсации Q с помощью конденсаторов и с ней необходимо бороться. Этот вопрос подробно рассматривается в разделе 5.

В отличие от двигателя постоянного тока, самой простой, надежной и дешевой электрической машиной является асинхронный короткозамкнутый двигатель переменного тока. Для регулирования скорости этого типа электродвигателя применяются различные типы преобразователей частоты (ПЧ). Самые распространенные среди них – это инверторы напряжения с промежуточным звеном постоянного тока, которые и рассматриваются в следующем разделе.

2. Частотно-регулируемый электропривод переменного тока

На рис. 4 представлена блок-схема силовой части ПЧ с промежуточным звеном постоянного тока (так называемый инвертор напряжения), который питает асинхронный короткозамкнутый двигатель. Выпрямитель на блок-схеме состоит из неуправляемой одно- или трехфазной мостовой схемы. Однофазная версия используется только в маломощных преобразователях. Выпрямитель преобразует переменное напряжение сети в постоянное напряжение. Далее оно сглаживается в промежуточном контуре конденсатором. В идеальном случае напряжение промежуточного контура равно амплитуде линейного напряжения питающей сети: $U_{ZK} = \sqrt{2}U_N$.

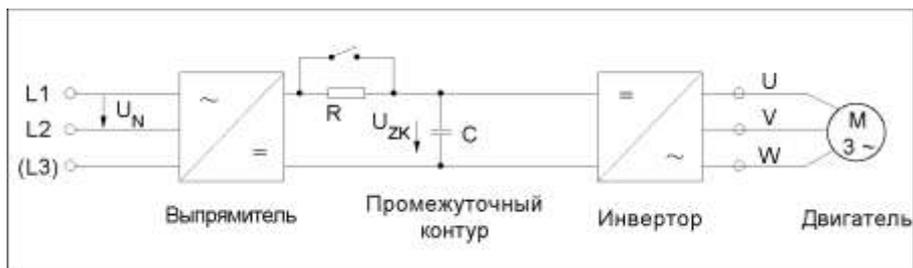


Рис. 4. Блок-схема силовой части ПЧ

Инвертор преобразует постоянное напряжение промежуточного контура в трехфазное напряжение, регулируемое по частоте и величине путем широтно-импульсной модуляции. Это напряжение используется для управления трехфазным асинхронным двигателем.

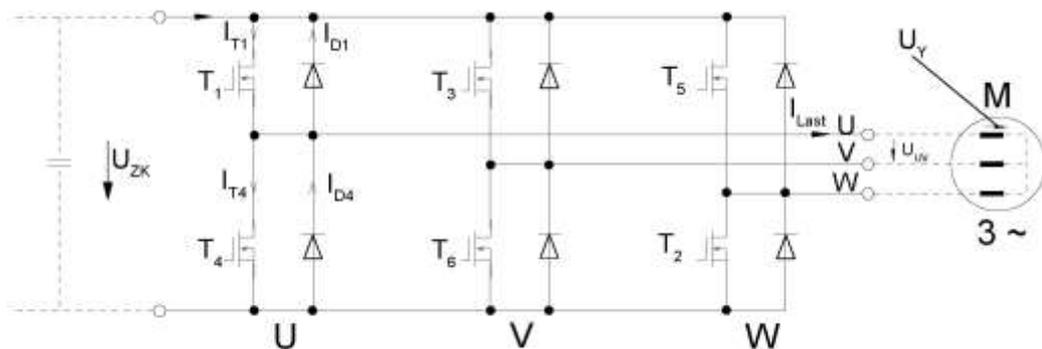


Рис. 5. Схема инвертора

При преобразовании постоянного тока в переменный в инверторе используются транзисторы, которые работают в переключающем режиме. В начале 90-х годов доминировали биполярные транзисторы с относительно малыми частотами переключения – до 2 кГц. Сегодня используется полевые транзисторы с низкими потерями и IGBT-транзисторы. Эти типы транзисторов обеспечивают частоты переключения до 16 кГц. Схема инвертора для преобразования постоянного тока в переменный приведена на рис. 5.

Выходное напряжение преобразователя частоты формируется “нарезанием”, т.е. циклическим подключением-выключением с помощью транзисторов постоянного напряжения промежуточного звена постоянного тока. Таким образом, выходное напряжение состоит из прямоугольных импульсов, пиковое значение которых всегда равно напряжению промежуточного звена постоянного тока.

Высокая несущая частота, т.е. частота, с которой транзисторы включаются и выключаются в течение полуволны, обеспечивает более точное приближение тока двигателя I_{Last} к синусоидальной форме, и, следовательно, вызывает меньшие дополнительные потери в двигателе. При несущей частоте 16 кГц влияние высших гармоник на двигатель становится просто несущественным. Однако при повышении несущей частоты возрастают потери от переключения транзисторов в самом инверторе.

Проанализируем входное напряжение и входной ток ПЧ. Входное напряжение преобразователя обычно очень близко к синусоидальной форме. Отклонения случаются только когда оно несколько падает в районе максимального значения из-за зарядного тока конденсатора в звене постоянного тока, если полное сопротивление питающей сети велико, т.е. в случае слабой сети. Входной ток состоит из пиков, которые возникают всегда, когда конденсатор промежуточного контура подзарядается через входной выпрямитель (рис. 6).

Эта подзарядка начинается, когда напряжение промежуточного контура U_{ZK} становится равным величине мгновенного сетевого напряжения U_N и выпрямительный мост переходит от закрытого состояния в проводящее. Этот ток, кроме первой гармоники, содержит 3-ю, 5-ю, 7-ю и другие достаточно существенные по величине гармоники (рис. 7).

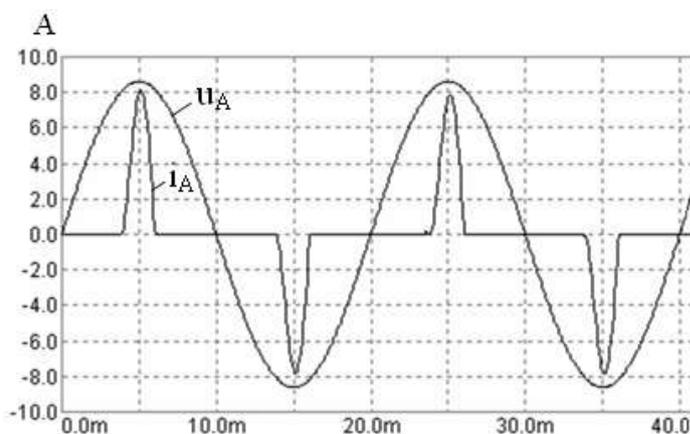


Рис. 6. Осциллограммы входных напряжения и фазного тока ПЧ с однофазным подключением

Пик первичного тока примерно в 3...5 раз больше действующего значения и амплитуды первой гармоники (рис. 7). Амплитуда токовых пиков увеличивается при возрастании нагрузки на двигатель. Это происходит потому, что вне интервала подзарядки промежуточного конденсатора напряжение на нем падает в большей степени из-за большого тока двигателя (инвертора) и во время интервала подзарядки промежуточного конденсатора требуется большой ток для восстановления напряжения до амплитудного значения напряжения питающей сети $\sqrt{2}U_N$.

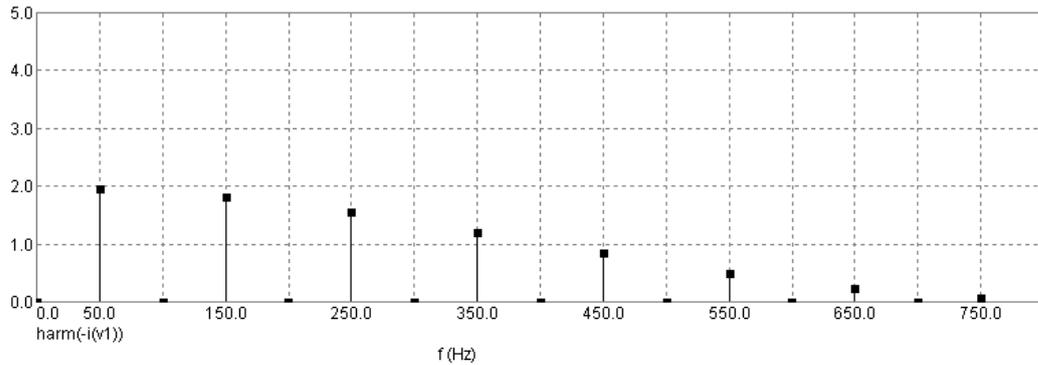


Рис. 7. Гармонический состав тока инвертора с однофазным подключением

Графики тока и напряжения на рис. 6 справедливы не только для ПЧ, но и для всех схем с однофазными неуправляемыми выпрямителями, нагруженными на конденсатор. $\cos\varphi$ для таких преобразователей приблизительно равен 1. Однако в сети имеется значительная по величине мощность искажения, которая может быть снижена линейными фильтрами, если это необходимо.

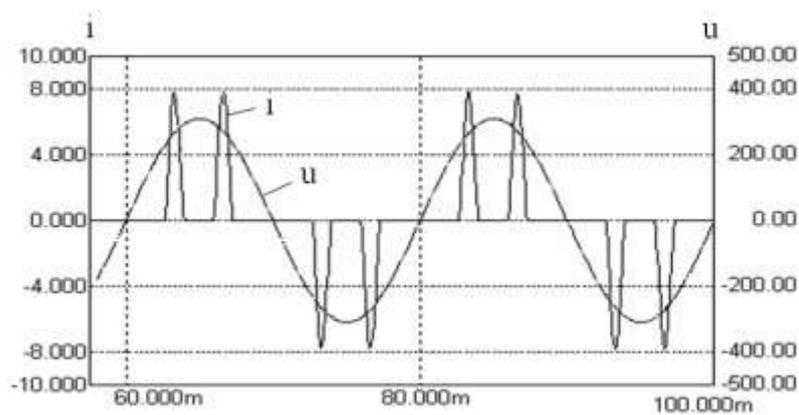


Рис. 8. Осциллограммы входных напряжения и фазного тока для Ч с трехфазным подключением

На рис. 8 приведены осциллограммы входных напряжения и фазного тока для схемы ПЧ с трехфазным подключением. На рис. 9 приведена диаграмма гармонического состава входного тока. Этот ток, кроме первой гармоники, содержит существенные 5-ю, 7-ю 11-ю и более высокие гармоники.

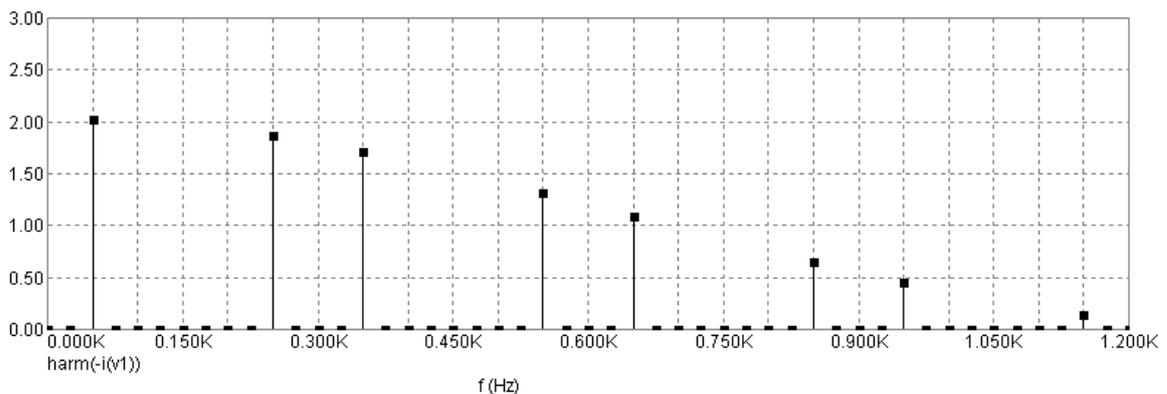


Рис. 9. Гармонический состав фазного тока при трехфазном подключении ПЧ

Отметим, что гармонический состав сетевого тока у ПЧ хуже, чем у управляемых выпрямителей с фазовым принципом управления для питания двигателей постоянного тока (см.

рис. 3). Это обусловлено тем, что сетевой ток ПЧ является импульсным и в большей степени отличается от синусоиды, чем у выпрямителей для двигателей постоянного тока. Но все же при этом у ПЧ $\cos\varphi = 1$. При подключении к сети нескольких ПЧ их сетевые токи будут суммироваться, причем пики токов у всех преобразователей по отношению к напряжению сети будут располагаться в одном и том же месте, что может привести к искажению напряжения сети.

Преобразование энергии в частотном электроприводе

На рис. 10 приведена диаграмма преобразования энергии в частотном приводе – рис. 10.

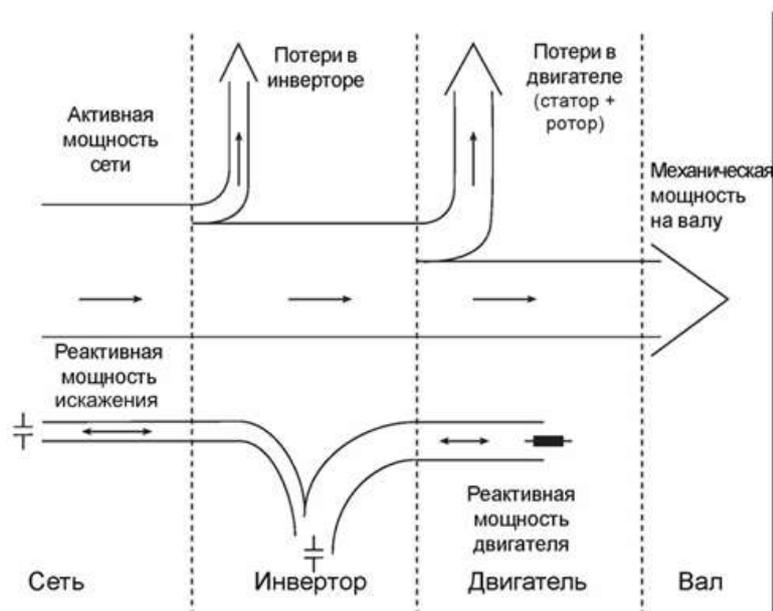


Рис. 10. Энергетический баланс частотного привода

Отмечаем, что на диаграмме для получения полезной мощности на валу двигателя из питающей сети потребляется только активная мощность и с сетью происходит обмен на высших гармониках, т.е. циркулирует мощность искажения. Реактивная мощность двигателя, необходимая для создания поля двигателя, обеспечивается конденсатором в звене постоянного тока и не нагружает сеть.

Выводы по частотно-регулируемому электроприводе переменного тока

1. Применение асинхронных двигателей с ПЧ обеспечивает $\cos\varphi = 1$ во всем диапазоне регулирования скорости, так как на входе ПЧ установлен неуправляемый выпрямитель (т.е. нет фазового управления). Но и здесь присутствует мощность искажения. С ней можно бороться средствами, которые рассматриваются в следующем разделе.

2. Мощность искажения может быть существенной и тогда должна компенсироваться с помощью пассивных или активных фильтров.

3. Компенсация реактивной мощности и мощности искажений

Компенсация реактивной мощности

Работа следующих потребителей всегда сопровождается циркуляцией реактивной мощности:

- асинхронные двигатели ($\cos\varphi \sim 0,5-0,7$);
- электроприводы постоянного тока с управляемыми выпрямителями ($\cos\varphi$ зависит от уровня скорости двигателя);
- выпрямительные электролизные установки ($\cos\varphi \sim 0,6$);

- электродуговые печи ($\cos\varphi \sim 0,6$);
- индукционные печи ($\cos\varphi \sim 0,2-0,6$);
- сварочные трансформаторы ($\cos\varphi \sim 0,4$);
- лампы дневного света ($\cos\varphi \sim 0,5-0,6$).

Проблема компенсации реактивной мощности всегда занимала важное место в общем комплексе вопросов повышения эффективности передачи, распределения и потребления электрической энергии [2, 4, 12, 13]. Правильное решение таких задач в значительной мере предопределяет экономию денежных и материальных ресурсов, повышение качества электроснабжения. Еще в 30-е годы прошлого века в начале индустриализации им уделялось серьезное внимание. Считалось допустимым для предприятия работать на границе раздела предприятие–энергосистема с $\cos\varphi$ не ниже 0,85. За повышение $\cos\varphi$ выше этой величины производилась скидка с тарифа, за понижение – надбавка.

Был период, когда предприятие не поощрялось и не наказывалось, имея $\cos\varphi$ в пределах 0,92–0,95 при питании от сетевых районных подстанций, сохраняя возможность работать с $\cos\varphi = 0,85$.

В рыночных условиях речь может идти об эффективности электрического хозяйства каждого отдельного потребителя, определяемой не приведенными затратами, а действующими в развитых странах методами оценки инвестиций. При создании полноценного рынка услуг по регулированию реактивной мощности станет реальным положение, когда при установке компенсирующих устройств в своих электрических сетях потребители получают компенсацию за долю эффекта от снижения потерь электроэнергии (мощности) в электрических сетях энергосистем в виде скидки с тарифа на активную электроэнергию. И, кроме того, компенсация будет получена не только за снижение потерь от циркуляции реактивной мощности, но и за услуги по поддержанию уровня напряжения в соответствии с действующими стандартами и нормами.

В приказе министра В.Б. Христенко от 22 февраля 2007 г. № 49 [7] п.7 устанавливаются следующие предельные значения $\cos\varphi$ в часы больших суточных нагрузок электрической сети для потребителей, присоединенных к сетям напряжением ниже 220 кВ:

Положение точки присоединения потребителя к электрической сети:	$\text{tg}\varphi$	$\cos\varphi$
напряжением 110 кВ (154 кВ)	0,5	0,90
напряжением 35 кВ (60 кВ)	0,4	0,93
напряжением 6 - 20 кВ	0,4	0,93
напряжением 0,4 кВ	0,35	0,95

К сожалению положения этого приказа до сих пор не исполняются.

Рассмотрим подробно способы компенсации реактивной мощности у потребителя. Источниками реактивной мощности являются:

- силовые статические конденсаторы;
- синхронные двигатели в режиме перевозбуждения;
- синхронные компенсаторы;
- тиристорные источники реактивной мощности;

Наиболее распространенными источниками реактивной мощности являются конденсаторные батареи. С помощью конденсаторов величины перетоков реактивной мощности могут быть уменьшены и даже полностью устранены. Конденсаторы целесообразно устанавливать непосредственно в местах появления реактивной мощности. Обмен энергией, в этом случае, будет происходить по кратчайшему пути между установками, требующими для своей работы реактивную мощность, и конденсаторами. Между этими установками и источником энергии будет происходить циркуляция только некомпенсированной части реактивной энергии.

В последнее время все большее распространение получают автоматические устройст-

ва компенсации реактивной мощности. Данные устройства позволяют регулировать реактивную мощность путем включения и отключения необходимого количества ступеней (секций) с конденсаторами в автоматическом режиме. Автоматическое регулирование мощности конденсаторных установок может осуществляться по следующим параметрам: времени суток, напряжению, току нагрузки и значению реактивной мощности.

Обычно регуляторы оснащены измерителями тока, напряжения и цифровой обработкой измеренных величин, чем достигается высокая точность определения как действующего значения тока, так и $\cos\phi$. Приборы осуществляют вычисление основной гармонической составляющей активного и реактивного токов, используя алгоритм Fast Fourier Transforms (FFT) – быстрое преобразование Фурье. Подобным способом вычисляется и основная гармоника напряжения, чем обеспечивается высокая точность в условиях сильного искажения напряжения высшими гармониками.

Такие источники реактивной мощности, как синхронные двигатели, мало распространены в промышленности, а синхронные компенсаторы имеют большие мощности и кое-где сохранились на узловых подстанциях энергосистем.

Тиристорные источники реактивной мощности [9] обеспечивают плавное регулирование генерируемой реактивной мощности емкостного характера, имеют высокое быстродействие, сложнее конденсаторных батарей и дороже, поэтому меньше распространены.

Регулируемые (автоматические) конденсаторные установки выпускаются многими отечественными и зарубежными фирмами, например, КРМ-0,4 (УКМ-58) – НПО «ПромЭлектроАвтоматика» [6]; группа «РУСЭЛТ» [10]; фирма «НЮКОН» и др.

Компенсация мощности искажения

Гармоники тока, создаваемые нелинейными полупроводниковыми нагрузками, могут представлять собой серьезные проблемы для систем электроснабжения [8]. Гармонические составляющие представляют собой токи с частотами, кратными основной частоте источника питания, и обуславливают появление мощности искажения. Увеличение общего действующего значения тока при наличии высших гармоник в системе приводит к увеличению потерь и перегреву всего оборудования распределенной сети электропитания, снижению коэффициента мощности, ухудшению характеристик защитных автоматов и завышению требуемой мощности электрооборудования. В свою очередь высшие гармоники тока влияют на форму напряжения в системе электропитания, вызывая его несинусоидальность, которая отрицательно воздействует на изоляцию кабельных линий электропередач. Гармоники нарушают работу многих устройств. Но особенно чувствительны к ним конденсаторы, так как их сопротивление снижается пропорционально порядку (номеру) присутствующих гармоник. В определенных условиях могут возникать резонансные явления, приводящие к перегрузке конденсаторов, установленных для компенсации реактивной мощности, и к значительным искажениям кривой напряжения.

Если мощность источника гармоник значительна, то обычно требуется снижать уровень гармоник в сети. Соответствующее устройство (фильтрокомпенсирующее устройство или ФКУ) одновременно выполняет функции компенсации реактивной мощности и фильтрации гармоник.

В разделах 1 и 2 данной статьи приведен анализ гармоник тока управляемых выпрямителей и преобразователей частоты. Этот анализ показал, что управляемые выпрямители могут содержать существенные по величине 5-ю и 11-ю гармоники (а иногда и 7-ю). ПЧ с однофазным подключением к сети (обычно небольшой мощности) потребляют из сети очень значительные нечетные гармоники с 3-ей по 13-ю, а ПЧ с трехфазным подключением – 5-ю, 7-ю, 11-ю, 13-ю и 17-ю гармоники. Причем надо отметить, что фаза гармоник у нескольких подключенных выпрямителей изменяется при изменении угла управления и они могут взаимно компенсироваться, а у ПЧ фаза гармоник подключенных преобразователей всегда постоянна и гармоники от разных преобразователей суммируются.

Для компенсации высших гармоник могут применяться пассивные и активные фильтры высших гармоник.

Применение пассивных LC-фильтров, настроенных на определенный порядок гармоник, на входе трехфазного выпрямителя при 100%-й нагрузке обеспечивает снижение коэффициента искажения тока до величины 8–10%. Значения этого коэффициента в системе без фильтра может достигать 30% и более. Понятие «коэффициент искажения синусоидальности тока» характеризует степень отклонения формы периодической кривой тока от синусоидальной. В соответствии с ГОСТ 13109-97 [3,5] он определяется по формуле:

$$K_{и1} = \frac{\sqrt{\sum I(k)^2}}{I_{(1)}},$$

где $k=2$ и более – это номер гармоники.

В иностранной литературе ему соответствует коэффициент THD% – Total Harmonic Distortion – общее гармоническое искажение, которое выражается в процентах.

На рис. 11 приведена схема трехфазного LC-фильтра, настроенного на 5-ю гармонику, включенного на входе ПЧ с трехфазным питанием. Фильтр содержит продольные индуктивности L2, L3, L4 и поперечную цепь, состоящую из последовательно включенных индуктивностей L5, L6, L7 и конденсаторов C2, C3, C4, настроенных на определенную гармонику. Если фильтр настроен на 5-ю гармонику, то сопротивление поперечной цепи для 5-й гармоники близко к нулю, и ток, потребляемый из питающей сети, не будет содержать эту гармонику.

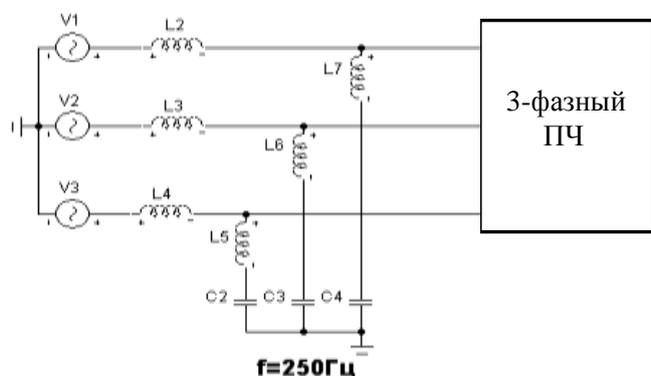


Рис. 11. Схема фильтра 5-й гармоники

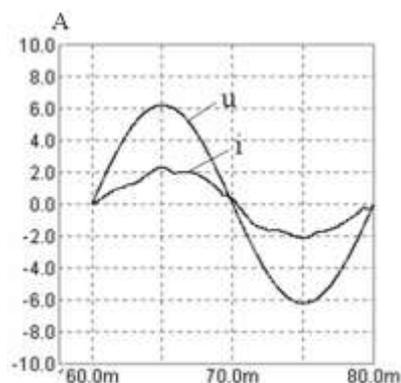


Рис. 12. Осциллограмма сетевого тока

На рис. 12 дан график тока, потребляемого из питающей сети, при подключении фильтра на входе ПЧ с трехфазным питанием. Фильтр настроен на 5-ю гармонику. На рис. 13 приведен гармонический состав этого тока.

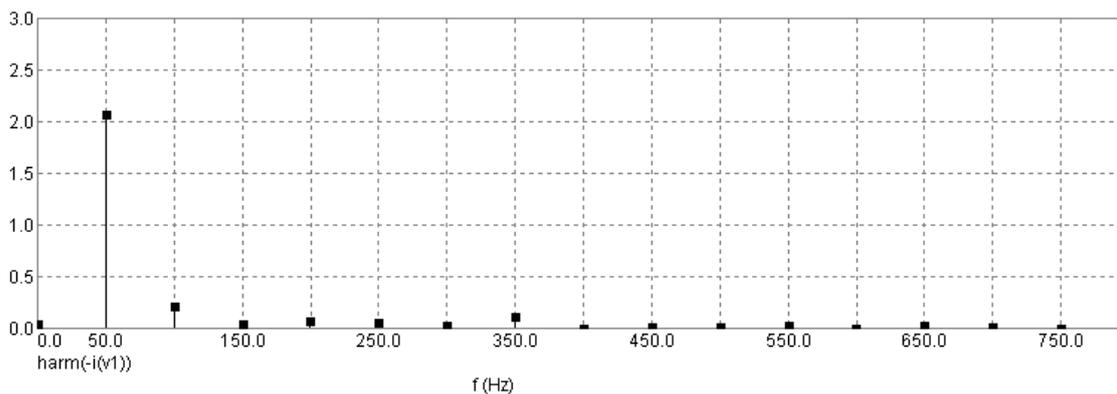


Рис. 13. Гармонический состав тока при подключении фильтра 5-й гармоники

Если сравнить токи и гармонический состав с аналогичными параметрами для ПЧ без фильтра (рис. 9), то можно отметить очень существенное улучшение формы тока и его гармонического состава, причем кроме 5-й значительно снизились 7-я и более высшие гармоники.

По рис. 12 можно заключить, что использование фильтра практически не повлияло на $\cos\varphi$, по-прежнему $\cos\varphi = 1$. Таким образом, ПЧ с фильтром на входе имеет хороший гармонический состав потребляемого из питающей сети тока и не потребляет реактивной мощности. Это важнейшее достоинство ПЧ с фильтром на входе, которое однозначно решает вопрос выбора типа электропривода – двигатель постоянного тока с управляемым выпрямителем или асинхронный короткозамкнутый двигатель переменного тока с ПЧ – в пользу асинхронного двигателя с ПЧ и фильтром на входе.

Рассмотренные пассивные фильтры гармоник выпускаются многими фирмами, например [10, 1]. Некоторые зарубежные фирмы выпускают активные фильтры [10]. Модели активных фильтров гармоник, выпускаемые фирмой MGE UPS SYSTEM под названием SineWave, могут обеспечить компенсацию действующих значений высших гармоник от 20 до 120 А. Их эффективность по компенсации высших гармоник может быть еще выше, чем у пассивных фильтров.

Выводы

В статье дан технический и экономический анализ состояния вопроса по реактивной мощности и часто сопутствующей ей мощности искажения в сетях потребителей. Для анализа использовалось осциллографирование на реальном объекте (бумагоделательная машина, расположенная в Нижегородской области), моделирование с помощью компьютерных программ (MicroCap 8) и технико-экономические расчеты. Большое внимание уделено анализу современного регулируемого электропривода постоянного и переменного тока, приводится их сравнение с точки зрения взаимодействия с питающей сетью.

На основе результатов анализа можно сформулировать следующие технико-экономические рекомендации:

1. Компенсации реактивной мощности и мощности искажения должно уделяться пристальное внимание на электропотребляющих предприятиях, иначе возможно появление дополнительных затрат, ухудшение качества и устойчивости электроснабжения, снижение надежности работы и срока службы электрооборудования.

2. При применении регулируемого электропривода с двигателем постоянного тока необходимо обращать особое внимание на скоростные режимы работы двигателя, правильно выбирать согласующие редукторы, оценивать уровень потребляемой реактивной мощности и принимать меры по ее компенсации с помощью фильтро-компенсирующих устройств.

3. При применении регулируемого электропривода переменного тока на основе ПЧ с асинхронным короткозамкнутым двигателем не требуется компенсации реактивной мощности, но особое внимание необходимо обращать на гармонический состав сетевого тока и при необходимости принимать меры по компенсации высших гармоник с помощью пассивных или активных фильтров высших гармоник.

4. Все меры по компенсации реактивной мощности и мощности искажений должны опираться на технико-экономические расчеты, ГОСТ 13109-97 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» и руководящие указания по этим вопросам.

5. При создании полноценного рынка услуг по регулированию реактивной мощности станет реальным положение, когда при установке компенсирующих устройств в своих электрических сетях потребители получают компенсацию за долю эффекта от снижения реактивной мощности и потерь электроэнергии (мощности) в электрических сетях энергосистем в виде скидки с тарифа на активную электроэнергию. И, кроме того, скидка будет получена не только за компенсацию реактивной мощности и снижение потерь, но и за услуги по поддержанию качества напряжения в соответствии с действующими стандартами и нормами [13].

б. Решение указанных вопросов может снять во многих регионах России вопрос о нехватке энергетических мощностей.

Библиографический список

1. Нижегородская сбытовая компания «Энергосбыт» <http://www.nsk.elektra.ru/>.
2. Зельцбург, Л. М. Экономика электроснабжения промышленных предприятий / Л. М. Зельцбург. – М.: Высшая школа, 1973.
3. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. <http://www.matic.ru/index.php?pages=123>
4. Актуальность компенсации реактивной мощности. Сайт GRAVICAPPA - альтернативные источники энергии - <http://gravicappa.com.ua/ua/technologies/krm/199-statya.html>
5. Качество электрической энергии. Сайт КУБАНЬЭНЕРГОСБЫТ - http://www.kubansbyt.ru/naselenie/guide/gr_kodeks/elektro/index.shtml
6. Компенсация реактивной мощности. Предприятие ПромЭлектроАвтоматика - <http://www.pea.ru/docs/equipment/reactive-power-compensation/compensation/>
7. Приказ министра В.Б. Христенко от 22 февраля 2007 г. № 49 О порядке расчета значений соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств. <http://www.energo-spektr.ru/norma/>
8. Гармонические искажения в электрических сетях и их снижение. Техническая коллекция Schneider Electric. - http://www.pro-schneider.ru/technical_support/technical_collection/22/
9. Статические тиристорные компенсаторы реактивной мощности (СТК) - http://enercomserv.ru/?issue_id=15
10. Климов, В. Компенсаторы реактивной мощности и мощности искажения в системах гарантированного электропитания промышленного назначения. / В. Климов, Ю. Карпиленко, В. Смирнов // Силовая электроника. 2008. № 3. http://www.ruselt-spb.ru/index.php?option=com_content&task=view&id=983
11. ООО НПЦ «ЕНЕРКОМ-СЕРВИС» Фильтры высших гармоник (ФКУ). Фильтрокомпенсирующие устройства. http://enercomserv.ru/?issue_id=16
12. Основные задачи формирования баланса реактивной мощности в ЕЭС России // Электрические станции. 2007. № 3.
13. Оплата за реактивную электроэнергию – важная составляющая рыночных отношений в энергетике // Промышленная энергетика. 2002. № 6.

*Дата поступления
в редакцию 15.07.2010*

V.A. Tikhomirov, V.G. Titov, S.V. Hvatov

TECHNICAL AND ECONOMIC ASPECTS OF THE USING CONTROLLED DRIVE CONSTANT AND ALTERNATING CURRENT

For two the most wide-spread types of the modern controlled drive constant and alternating current explored negative consequences from circulation in supplying network to reactive power and powers of the distortion, is executed analysis level losses to powers and their cost. Recommendations are given on compensations of the reactive power and powers of the distortion. The Material is considered on example of the perennial usage semiconductor drives of the machine on production of the paper on one of the enterprise Balahny.

Key words: drive of the direct current, drive of alternating current, reactive power, $\cos\varphi$, high harmonicas, power of the distortion, compensation to reactive power, compensation to powers of the distortion.