

Компенсаторы реактивной мощности

и мощности искажения в системах гарантированного электропитания промышленного назначения

В работе рассмотрены вопросы компенсации реактивной мощности и мощности искажения в системах гарантированного электропитания. Систематизированы основные понятия энергетических показателей в нелинейных электрических цепях. Описаны структуры ступенчатых компенсаторов реактивной мощности КРМ и активных фильтров гармоник АФГ. Рассмотрены резонансные явления на частотах высших гармоник в системах гарантированного электропитания.

Валерий Климов, к. т. н.

klimov@ruselt.ru

Юрий Карпиленко

karpilenko@ruselt.ru

Валерий Смирнов, к. т. н.

Основные энергетические показатели в электрических цепях

Энергетические показатели систем гарантированного электропитания характеризуют эффективность использования и потребления электрической энергии.

Полная мощность (S) характеризует величину загрузки сети оборудованием, равна произведению действующих значений напряжения и тока:

$$S = UI \text{ (ВА)} \quad (1)$$

и определяется тремя составляющими мощности:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + T^2}, \quad (2)$$

где P — активная мощность (Вт), Q — реактивная мощность (ВА_р), T — мощность искажения (ВА). Для линейных нагрузок имеем $T = 0$.

Реактивная мощность (Q) в общем случае представляет собой разность индуктивной и емкостной реактивных мощностей:

$$Q = Q_L - Q_C. \quad (3)$$

Коэффициент мощности (K_p) характеризует эффективность потребления энергии и представляет отношение активной мощности к полной:

$$K_p = P / S = \cos \varphi_1 K_{ни}, \quad (4)$$

где φ_1 — фазовый сдвиг между первыми гармониками напряжения и тока, $K_{ни}$ — коэффициент нелинейности:

$$K_{ни} = I_1 / I \leq 1, \quad (5)$$

где I_1 — действующее значение первой (основной) гармоники тока, I — действующее значение несинусоидального периодического тока:

$$I = \sqrt{\sum_{n=1} I_n^2}. \quad (6)$$

I_n — действующее значение n -ой гармоники тока, n — порядок высшей гармоники тока.

Коэффициент искажения синусоидальности характеризует степень отклонения формы периодической кривой тока от синусоидальной.

По определению ГОСТ 13109-97 [7] имеем:

$$K_{u1} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2} I_n^2}}{I_1}. \quad (7)$$

Без учета гармонических составляющих, значения которых менее 0,1%, допускается расчет коэффициента искажения по следующему выражению:

$$K_{u2} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2} I_n^2}}{I_1}. \quad (8)$$

Коэффициент нелинейности, влияющий на значение коэффициента мощности, может быть представлен через коэффициенты искажения синусоидальности:

$$K_{ни} = 1 / \sqrt{1 + K_{u1}^2} = \sqrt{1 - K_{u2}^2}. \quad (9)$$

Коэффициент полезного действия характеризует эффективность использования оборудования и представляет отношение выходной активной мощности к входной:

$$\eta = (P_{вых} / P_{вх}) \times 100\%. \quad (10)$$

Энергетический коэффициент — обобщенный показатель эффективности оборудования:

$$K_{\text{Э}} = \eta K_p, \quad (11)$$

Компенсация реактивной мощности

Как следует из выражения (11), один из факторов повышения эффективности оборудования — это увеличение коэффициента мощности. Последний, как следует из (4), зависит от фазового сдвига (φ_1) между первыми гармониками напряжения и тока. Электрические потребители индуктивного характера (например, индукционные электродвигатели) потребляют из сети не только активную, но и индуктивную реактивную мощность, величина которой пропорциональна $\sin\varphi_1$. Появление этой составляющей мощности приводит к увеличению действующего значения тока, потребляемого из сети, и, как следствие, — к увеличению потерь в кабелях, трансформаторах и других распределительных устройствах систем гарантированного питания. Кроме того, увеличиваются общие расходы на электроэнергию. Поэтому необходимо предусматривать меры по снижению реактивной мощности, потребляемой из сети. Этого можно достигнуть на основании (3) с помощью подключения определенной емкостной нагрузки — конденсаторов, которые снижают суммарную реактивную мощность, потребляемую из сети. Устройства, обеспечивающие компенсацию реактивной мощности и, следовательно, повышающие коэффициент мощности оборудования, получили название конденсаторов реактивной мощности (КРМ).

Ступенчатые КРМ переключают секции конденсаторных батарей, обеспечивая оптимальную компенсацию реактивной мощности. В зависимости от используемых коммутаторов КРМ делятся на релейные (контакторные) и тиристорные.

На рис. 1 представлена схема трехфазного контакторного КРМ с 4 секциями при соединении конденсаторов в «треугольник». Возможна реализация трехфазных КРМ путем соединения конденсаторов фаз в «звезду», однако это приводит к необходимости использования конденсаторов большей емкости. Количество секций может достигать 12 и более, они подключаются вручную или автоматически. При работе в режиме автоматического регулирования подключение и отключение конденсаторных ступеней производится автоматически, что обеспечивает наиболее высокий коэффициент мощности.

При работе в режиме ручного регулирования подключение и отключение ступеней производит оператор, что позволяет установить необходимый коэффициент мощности.

Установка КРМ состоит из следующих частей:

- конденсаторные батареи, соединенные по схеме «треугольник» с разрядными резисторами (С);
- контакторы с дополнительной контактной группой, обеспечивающей предварительный заряд конденсаторов (КМ);
- предохранители (FU);
- автоматический выключатель (QF);
- регулятор коэффициента мощности (контроллер).

Коммутация трехфазных конденсаторов производится быстродействующими контакторами с малым дребезгом контактов. Дополнительная группа контактов таких контакто-

ров замыкается раньше основной группы, что ограничивает и демпфирует броски пускового тока за счет подключения зарядных резисторов.

В зависимости от вида исполнения в КРМ могут использоваться конденсаторы, наполненные инертным газом или пожаробезопасной смолой. Разрядные резисторы обеспечивают разряд конденсатора до напряжения менее 75 В за время не более 60–90 с.

Некоторые особенности расчета параметров и выбора элементов КРМ

Номинальная мощность КРМ — это реактивная мощность (кВАр), которую рассчитывают исходя из оценки требуемой емкости, рабочей частоты и номинального напряжения.

Номинальное напряжение конденсатора рассчитывается по выражению:

$$U_C = \frac{U_H}{1 - \frac{p}{100\%}}, \quad (12)$$

где U_H — номинальное напряжение сети; p — коэффициент расстройки последовательного контура L-C, где L — индуктивность дополнительного фазного дросселя и индуктивность рассеяния силового трансформатора ТП.

Максимальное значение действующего тока конденсатора выбирается из соотношения:

$$I_{max} = (1,3 - 1,5) I_H, \quad (13)$$

где I_{max} — действующее значение тока конденсатора при номинальном напряжении на основной частоте без учета высших гармоник и переходных процессов при переключениях конденсаторных батарей.

Номинальная емкость трехфазных конденсаторов (при соединении в «треугольник») определяется по выражению:

$$C = [Q \text{ (кВАр)} / 6\pi f U_H^2] 10^9 \text{ (мкФ)}. \quad (14)$$

Номиналы разрядных сопротивлений выбираются из условия обеспечения разряда емкостей до напряжения 50–75 В за время не более 1–3 мин [8, 9]. Возможно использование разрядных дросселей, обеспечивающих снижение потерь в разрядных цепях по сравнению с резисторами.

Время переключения отдельных ступеней контакторных КРМ составляет от 20 до 90 с.

Регулятор коэффициента мощности (контроллер) обеспечивает автоматическое переключение конденсаторных секций. Он измеряет истинное значение коэффициента мощности и подключает или отключает конденсаторы для того, чтобы достичь необходимого значения $\cos\varphi$. Электронная измерительная система контролирует активную и реактивную составляющую мощности путем измерения мгновенных значений напряжения и тока в силовой сети. На основе этих измерений вычисляется фазовый сдвиг между током и напряжением, и это значение сравнивается с предварительно заданной величиной.

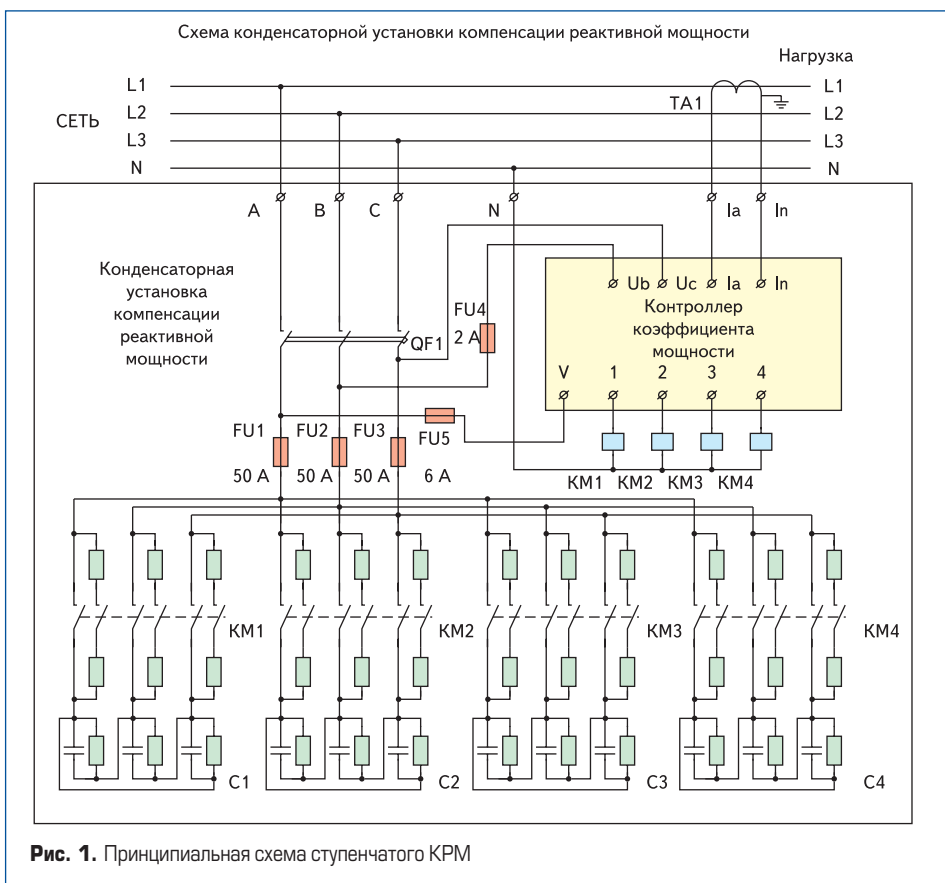


Рис. 1. Принципиальная схема ступенчатого КРМ

Таблица 1. Программируемые параметры режимов работы контроллера на примере регулятора коэффициента мощности РКМ-15

№ операции	Описание регулируемого параметра	Диапазон установки	Заводская установка
P-00	Выбор режима работы регулятора	Ручной «Авто»	«Авто»
P-01	Порог $\cos\phi$, при котором производится подключение следующей ступени конденсаторов	Инд. 0,80–1,0	0,95
P-02	Порог $\cos\phi$, при котором производится отключение ступени конденсатора	Инд. 0,9–эмк. 0,9	1,00
P-03	Задержка на подключение очередной ступени конденсатора, с	5–250	30
P-04	Задержка на отключение очередной ступени конденсатора, с	1–250	30
P-05	Предельное напряжение отключения конденсаторов, В	400–500	440
P-06	Порог чувствительности реактивной мощности, кВАр	0–99	5
P-07	Коэффициент компенсации реактивной мощности, %	20–120	100
P-08	Время разряда ступени конденсаторной батареи (задержка на повторное включение), с	0–240	60
P-09	Выбор программы коммутации конденсаторных ступеней	5 программ	В зависимости от исп. установки
P-10	Установка количества ступеней	1–12	В зависимости от исп. установки
P-11	Установка значения первичного тока трансформатора, А	5–10 000	500
C-01–C-12	Мощность каждой ступени конденсаторов, кВАр	0–99	В зависимости от исп. установки
P-13	Подтверждение записи установленных параметров	«ДА», «НЕТ»	«НЕТ»

Алгоритм работы контроллера построен таким образом, чтобы достичь необходимого значения $\cos\phi$ при минимуме переключений. Это позволяет продлить срок службы контакторов и конденсаторов. В таблице 1 приведено краткое описание программируемых параметров режимов работы контроллера на примере регулятора коэффициента мощности РКМ-15 (ЗАО «Электромаш»).

Установленные задержки на подключение и отключение конденсаторов (P-01, P-02) определяют время, через которое произойдет подключение или отключение очередной ступени конденсатора, если необходимость этого не отпадет за это время. Предельное напряжение отключения конденсатора (P-05) соответствует значению, при котором схема защиты произведет аварийное отключение конденсаторов для защиты их от пробоя повышенным напряжением. Порог чувствительности реактивной мощности (P-06) соответствует значению кВАр, ниже которого регулятор не произведет подключение конденсаторов. Коэффициент компенсации реактивной мощности (P-07) представляет отношение суммарной реактивной мощности конденсаторов к реактивной мощности нагрузки.

Программа включения/выключения (P-09) определяет алгоритм коммутации конденсаторных ступеней. В регуляторе РКМ-15 есть 5 программ, соответствующих следующим алгоритмам коммутации:

- программа подключения конденсаторных ступеней равной мощности по принципу «первым включен — первым выключен»: 1:1:1:1:1...;
- коммутация конденсаторных ступеней в следующем соотношении мощностей:
 - 1:2:2:2:2...;
 - 1:2:4:4:4...;
 - 1:2:4:8:8....
- программа оптимизации включения/выключения, когда контроллер рассчитывает, какое количество конденсаторов необходимо подключить или отключить для компен-

сации измеренной реактивной мощности, и производит коммутацию требуемого количества ступеней конденсаторов в зависимости от их реактивной мощности. Такая программа обеспечивает оптимальную систему для достижения быстрой компенсации с небольшим числом включений.

Тиристорные КРМ применяются при необходимости коммутации конденсаторных батарей за короткий промежуток времени, что требуется в системах с резко переменной индуктивной нагрузкой. В отличие от контакторных КРМ они обладают высоким быстродействием (20 мс), так как нет необходимости в задержке срабатывания на время разряда конденсатора. Включение тиристоров происходит в момент, когда напряжение сети и конденсатора равно. Конденсаторы подключаются без значительных пусковых токов, что продлевает их срок службы. Для защиты тиристоров от перегрузок используются быстродействующие предохранители.

Компенсация мощности искажения

Гармоники тока, создаваемые нелинейными нагрузками, могут представлять собой серьезные проблемы для систем электропитания. Гармонические составляющие представляют собой токи с частотами, кратными основной частоте источника питания, и вызывают появление мощности искажения. Высшие гармоники тока, накладываемые на основную гармонику, приводят к искажению формы тока. В свою очередь искажение тока влияет на форму напряжения в системе электропитания, вызывая недопустимые воздействия на нагрузки системы. Увеличение общего действующего значения тока при наличии высших гармоник в системе приводит к перегреву всего оборудования распределенной сети электропитания, снижению коэффициента мощности, снижению электрического и механического КПД нагрузок, ухудшению

характеристик защитных автоматов и превышению требуемой мощности автономных электроэнергетических установок.

Высшие гармоники в составе входного тока источников бесперебойного питания (ИБП)

Высшие гармоники тока, создаваемые ИБП как объектом с нелинейной входной характеристикой, могут приводить к серьезным проблемам электромагнитной совместимости (ЭМС) для систем гарантированного электропитания. Природа возникновения и последствия воздействия высших гармонических составляющих с частотами, кратными основной частоте сети, описаны в работах [1, 2]. Отметим, что искажение синусоидальности тока влияет также на форму напряжения питания других потребителей, подключенных к тому же фидеру. Характерно, что наиболее существенными по величине высокочастотными гармониками во входном токе трехфазного ИБП с 6-полупериодным выпрямителем являются 5-я и 7-я гармоники (250 и 350 Гц), а в системах с 12-полупериодным выпрямителем 11-я и 13-я гармоники (550 и 650 Гц). Таким образом, ИБП, как объект системы гарантированного питания, представляет собой генератор высших гармоник в другие объекты системы (сеть или генератор ДГУ). В зависимости от места подключения в распределительной сети и процентного соотношения с линейными нагрузками, подключенными к той же сети, ИБП может искажать форму напряжения сети и оказывать влияние на других потребителей. Предельно допустимые значения гармонических составляющих напряжения в точке общего подключения к электрическим сетям с номинальным напряжением 380 В по требованиям [7] не должны превышать 9% для 5-й и 5,25% для 11-й гармоники. Предельно допустимое значение коэффициента искажения синусоидальности напряжения сети 380 В не должно превышать 12%. При этом происходит увеличение действующего значения тока, потребляемого из сети, приводящее к повышенной нагрузке оборудования распределительной сети электропитания.

Среди основных способов подавления высших гармоник в системах гарантированного электропитания следует отметить:

- применение пассивного фильтра 5-й гармоники в трехфазных ИБП с 6-полупериодным выпрямителем;
- применение активных фильтров гармоник в трехфазных системах.

Применение пассивных фильтров

Применение последовательно включенных входных фазных дросселей в ряде случаев не позволяет уменьшить гармонические искажения тока до желаемых пределов. В этом случае целесообразно применение пассивных LC-фильтров, настроенных на определенный порядок гармоник. Подключение фильтра на входе 6-полупериодного выпрямителя при 100%-ной нагрузке обеспечивает снижение коэффициен-

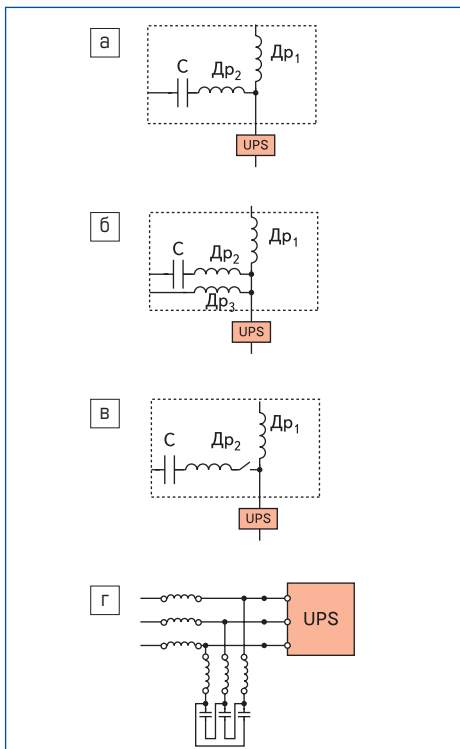


Рис. 2. Пассивные фильтры:
 а) некомпенсированный LC-фильтр;
 б) компенсированный LC-фильтр;
 в) некомпенсированный LC-фильтр с коммутатором;
 г) 3-фазный вариант LC-фильтра

та искажения тока до величины 8–10%. Значения этого коэффициента в системе без фильтра может достигать 30% и более. На рис. 2г приведена реализация трехфазного LC-фильтра, применяемого в 3-фазных ИБП.

Различают следующие разновидности пассивных фильтров [2]:

- некомпенсированный LC-фильтр;
- компенсированный LC-фильтр;
- некомпенсированный LC-фильтр с коммутатором.

Некомпенсированный фильтр содержит продольную индуктивность $Dp1$ и поперечную цепь, состоящую из последовательно включенных индуктивности $Dp2$ и емкости C , настроенных на определенную гармонику (рис. 2а). Если фильтр настроен на 5-ю гармонику, то сопротивление поперечной цепи близко к нулю, и ток, потребляемый от источника, не будет содержать эту гармонику. Недостатком такого фильтра является следующее: при использовании в качестве первичного источника питания дизель-генераторной установки (ДГУ) с ограниченной установочной мощностью этот фильтр может обеспечить относительно высокое значение емкостной составляющей тока нагрузки (10–30%).

При включении ИБП на ДГУ, когда осуществляется «мягкий» старт выпрямителя, активная мощность, потребляемая нагрузкой, равна нулю, и генератор ДГУ оказывается нагруженным только на емкостное сопротивление фильтра. Значительная емкостная составляющая потребляемого от генератора тока может привести к нарушению нормальной работы

генераторной системы и отключению ДГУ. Следовательно, возможность использования некомпенсированных LC-фильтров должна быть проанализирована с точки зрения согласования характеристик генератора и параметров фильтра.

Компенсированный фильтр содержит дополнительную поперечную индуктивность $Dp3$, способствующую тому, что фильтр по отношению к генератору имеет индуктивный характер (рис. 2б). Это снижает емкостную составляющую потребляемого тока и облегчает работу генератора в пусковом и установившемся режимах. Однако наличие $Dp3$ приводит к снижению коэффициента мощности системы в целом.

Некомпенсированный фильтр с коммутатором удобен при использовании в системе ДГУ ограниченной мощности, соизмеримой с мощностью ИБП. Поперечная цепь фильтра подключается автоматически только после выхода ИБП на номинальный режим (рис. 2в). Таким образом, не требуется применение ДГУ повышенной мощности и не снижается коэффициент мощности системы.

Применение активных фильтров гармоник

Активный фильтр гармоник АФГ (Active Harmonic Filter) [2] подключается параллельно нелинейной нагрузке (рис. 3). В ряде источников можно встретить также название «активный кондиционер гармоник, АКГ».

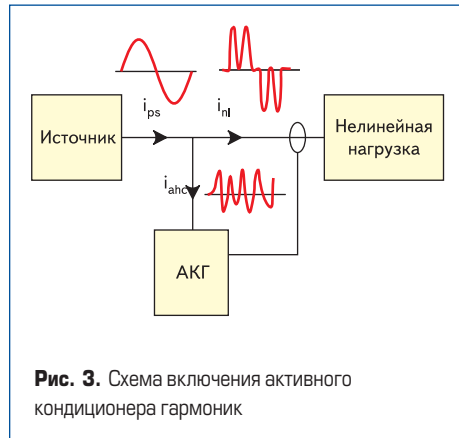


Рис. 3. Схема включения активного кондиционера гармоник

Принцип действия АФГ основан на анализе гармоник тока нелинейной нагрузки и генерировании в распределительную сеть таких же гармоник тока, но с противоположной фазой. Как результат этого, высшие гармонические составляющие тока нейтрализуются в точке подключения АФГ. Это означает, что они не распространяются от нелинейной нагрузки в сеть и не искажают напряжения первичного источника энергии.

Ток нелинейной нагрузки содержит основную (i_1) и высшие (i_n) гармоники:

$$i_{nl} = i_1 + \sum_{n \geq 2} i_n \quad (15)$$

АФГ содержит противофазные току нагрузки высшие гармоники:

$$i_{ahc} = - \sum_{n \geq 2} i_n \quad (16)$$

В результате ток, потребляемый от источника, практически синусоидален, так как содержит только основную (первую) гармонику:

$$i_{ps} = i_{nl} + i_{ahc} = i_1 \quad (17)$$

Таким образом, источник обеспечивает только основную гармонику тока нагрузки, а АФГ покрывает практически весь спектр высших гармоник от 2-й до 25-й. АФГ может быть установлен в любой точке распределительной сети и способен компенсировать высшие гармоники от одной или нескольких нелинейных нагрузок. Модели АФГ, выпускаемые MGE UPS SYSTEM под названием SineWave, могут обеспечить компенсацию действующих значений высших гармоник от 20 до 120 А [2].

На рис. 4 изображены кривые токов в системе с АФГ при работе на нелинейную нагрузку типа ИБП с трехфазным мостовым выпрямителем.

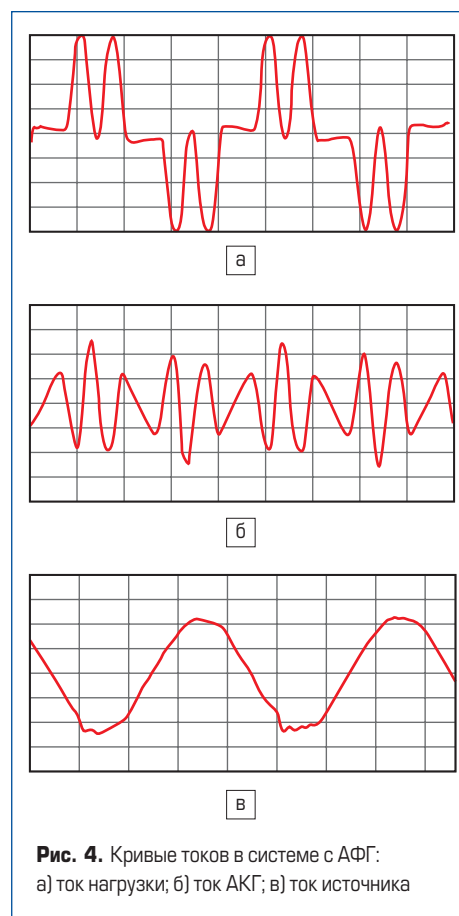


Рис. 4. Кривые токов в системе с АФГ:
 а) ток нагрузки; б) ток АКГ; в) ток источника

Связь между действующими значениями токов нагрузки и источника устанавливается следующим выражением:

$$I_{ps} = I_{nl} \sqrt{\frac{1 + K_{ups}^2}{1 + K_{unl}^2}} \quad (18)$$

В первом приближении можно считать, что действующее значение тока АФГ, необходимое для компенсации высших гармоник, генерируемых нелинейной нагрузкой в распределительную систему, определяется следующим соотношением:

$$I_{ahc} = \sqrt{F_{nl} - I_{ps}^2} \quad (19)$$

Повышенное значение тока, получаемое из выражения (19), объясняется тем, что АФГ практически обеспечивает компенсацию гармоник не выше 25-й и может быть настроен на компенсацию гармоник ниже указанного порядка, тогда как в составе тока нагрузки могут присутствовать гармоники более высокого порядка.

Структурная схема АФГ приведена на рис. 5. В состав АФГ входят следующие узлы: IGBT-преобразователь, устройство управления и контроля, блок защиты и «мягкого» пуска и токовые датчики. Преобразователь АФГ содержит трехфазный преобразователь на IGBT-транзисторах, коммутируемых с тактовой частотой 16 кГц, два конденсатора С1, С2 и линейные дроссели в каждой фазе (Др1). Устройство управления и контроля состоит из блока анализа гармоник тока, блока установки номеров компенсируемых гармоник, блока управления преобразователем и мониторинга.

На анализатор гармоник поступают сигналы с быстродействующих датчиков тока нагрузки (ДТ1) и тока АФГ (ДТ2). Блок защиты и «мягкого» пуска содержит быстродействующие предохранители и с помощью контактора и балластного сопротивления обеспечивает плавный заряд конденсаторов С1, С2 в период включения АФГ. Применение АФГ обеспечивает значительное снижение коэффициента амплитуды тока в распределительной сети по сравнению с существующими коэффициентами тока нелинейных нагрузок. Это, в свою очередь, способствует увеличению коэффициента мощности системы и уменьшению потерь на участках распределительной сети.

Резонансные явления на частотах высших гармоник

При наличии высших гармоник в электрических цепях с сосредоточенными и распределенными параметрами, каковыми можно представить оборудование распределительных сетей системы электропитания, возникает опасность появления резонансных явлений. При возникновении резонансного или близкого к нему режима на какой-либо высшей гармонике тока или напряжения эта составляющая оказывается больше, чем амплитудное значение первой гармоники на том же участке цепи. Это отрицательным образом может сказаться на работоспособности отдельных устройств системы. Так, одним из факторов, влияющих на качество напряжения питания, является возможный резонанс токов на участке «силовой трансформатор ТП – компенсатор реактивной мощности (КРМ)», подключенный к шинам низкого напряжения силового трансформатора. Значение гармоники, на которой может возникнуть резонанс токов, можно определить из соотношения:

$$n = \sqrt{S_{mp} / (u_{кз} Q_{КРМ})}, \quad (20)$$

где S_{mp} — номинальная мощность трансформатора, кВА; $Q_{КРМ}$ — реактивная мощность

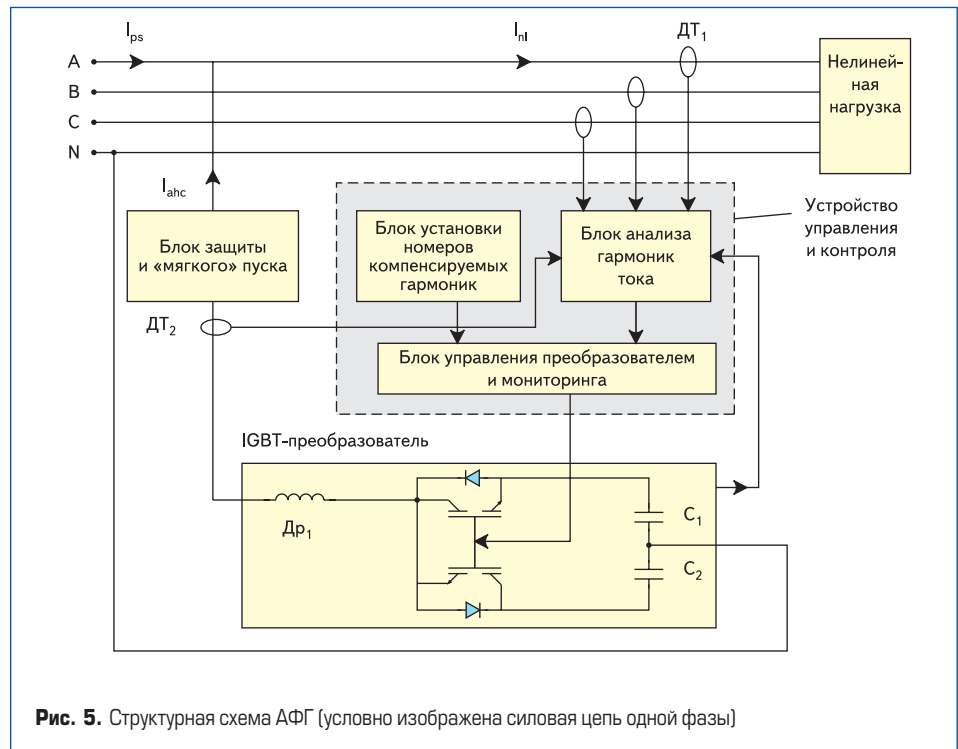


Рис. 5. Структурная схема АФГ (условно изображена силовая цепь одной фазы)

включенных ступеней КРМ, кВАр; $u_{кз}$ — относительное значение напряжения короткого замыкания трансформатора.

При питании электроустановок от ТП с трансформатором мощностью 1000 кВА и КРМ, каждая секция которой составляет 60 кВАр, резонанс токов может наступить при работе двух секций КРМ на частоте 550 Гц, соответствующей 11-й гармонике промышленной частоты. Именно эта гармоника присутствует в составе входного тока трехфазного ИБП с 12-полупериодным выпрямителем. При включенных секциях КРМ амплитуда 11-й гармоники увеличивается более чем в 2,5 раза [4]. Коэффициент 11-ой гармоники напряжения питания при этом будет превышать 5,5%, в то время как по требованиям стандарта [7] предельно допустимое значение этого показателя качества не должно превышать 5,25%.

При пониженных мощностях силового трансформатора ТП, например 100 кВА, и одной включенной секции КРМ резонанс токов может возникнуть на 5-й гармонике, характерной составляющей во входном токе трехфазных ИБП с 6-полупериодным выпрямителем [5].

Для снижения риска возникновения резонансных явлений в КРМ устанавливаются антирезонансные дроссели последовательно с конденсаторными батареями [6]. Антирезонансные дроссели обладают большим сопротивлением на частоте высших гармоник тока, и индуктивный характер сопротивления КРМ на частоте высшей гармоники обуславливает то, что резонансный контур в цепи КРМ — индуктивное сопротивление силового трансформатора не образуется. Рассогласованные конденсаторные секции КРМ предотвращают увеличение гармонических составляющих тока и напряжения, исключая резонансные явления. Резонансная частота последовательного контура, образованного антирезонансным дросселем и конденсаторной батареей, лежит

ниже частоты 5-й гармоники. Методика выбора параметров антирезонансного дросселя достаточно полно отражена в [8].

Таким образом, режим работы КРМ и выбор типа ИБП связаны с вопросами ЭМС в системах гарантированного питания и требуют детального изучения еще на стадии проектирования системы.

Литература

1. Климов В. П., Москалев А. Д. Проблемы высших гармоник в современных системах электропитания // Практическая силовая электроника. 2002. № 5.
2. Климов В. П., Москалев А. Д. Способы подавления гармоник в системах электропитания // Практическая силовая электроника. 2003. № 6.
3. Кузмина О. О совместной работе ДГУ и ИБП // Сети и бизнес. 2002. № 2(3).
4. Петухов В. С., Красилов И. А. Резонансные явления в электроустановках зданий // Технологии электромагнитной совместимости. 2003. № 4(7).
5. Климов В., Москалев А. Трехфазные источники бесперебойного питания: схемотехника и технические характеристики // Электронные компоненты. 2005. № 8.
6. Геворкян М. В. Современные компоненты компенсации реактивной мощности для низковольтных сетей. М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2003.
7. ГОСТ 13109-97. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
8. Конденсаторы и дроссели для компенсаторов реактивной мощности. www.electronic.com
9. Коррекция коэффициента мощности. Повышение качества электроэнергии. www.epcos.com