

ГЛАВА 6

ККМ С ИНТЕГРИРОВАНИЕМ ФУНКЦИЙ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ АКТИВНЫХ ФИЛЬТРОВ ВЫСШИХ ГАРМОНИК

Современным решением проблемы снижения уровня высших гармоник в сети, компенсации реактивной мощности и симметрирования токов нагрузки является применение активных фильтров (АФ) и статических компенсаторов (STATCOM). Но широкое применение этих устройств сдерживается их высокой стоимостью.

Введение современных стандартов качества электроэнергии определяет интенсивное развитие схемотехники выпрямителей с активной коррекцией коэффициента мощности – корректоров коэффициента мощности (ККМ). Наибольшее распространение среди однофазных систем получили ККМ на основе повышающего преобразователя (т.н. Boost-type PFC, рис. 2.1).

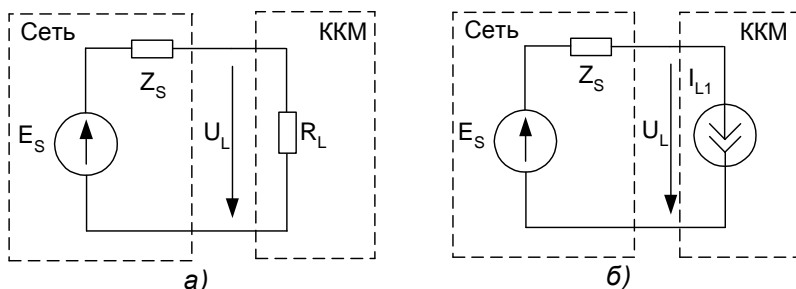


Рис. 6.1 – ККМ, эмулирующий: а) активное сопротивление; б) источник тока 1-й гармоники.

подавляющее большинство таких систем ведут себя по отношению к питающей сети как линейное активное сопротивление (рис. 6.1а). Существует также небольшое количество ККМ (например, на основе управляющей микросхемы *Mitsubishi M81012FP*) [9], ведущих себя как источники синусоидального тока первой гармоники (рис. 6.1б).

В обоих случаях ККМ не оказывает активного влияния на спектральный состав питающего напряжения (а в случае, показанном на рис. 6.1б, коэффициент гармоник напряжения THD_U может увеличиться из-за снижения амплитуды основной гармоники).

Поскольку современные сети изобилуют нелинейными нагрузками, встает задача компенсации их негативного влияния.

Так, на сегодняшний день имеется большое количество нагрузок, использующих промежуточное преобразование переменного питающего напряжения в постоянное. Обычно это преобразование осуществляется путем установки диодного моста и емкостного фильтра. Потребляемый ток такой нагрузки имеет ярко выраженные нечетные гармоники, преимущественно 3-ю и 5-ю, а типовой коэффициент мощности лежит в пределах (0,5...0,7). Наличие большого количества таких потребителей приводит к искажению формы кривой питающего напряжения, перегрузке нулевого провода и т.п. В достаточной степени устранить негативное влияние на сеть нелинейных нагрузок и довести параметры качества до современных требований с помощью пассивных средств не всегда представляется возможным. Радикальным решением проблемы является установка активных фильтров высших гармоник и/или оснащение потребителей корректорами коэффициента мощности.

АФ в настоящее время строятся с применением четырехквadrантных инверторов. Это продиктовано необходимостью обеспечить двунаправленный поток мгновенной активной мощности и приводит к усложнению силовой части и системы управления ею.

Силовая часть КKM, в свою очередь, оптимизирована для работы только при положительной мгновенной активной мощности (в 1-м и 3-м квадрантах), что делает невозможным применение для нее классических алгоритмов управления АФ.

Кроме особенностей силовой части, параллельные АФ обычно требуют установки датчиков тока компенсируемых нелинейных нагрузок. Впрочем, необходимость датчиков тока может быть устранена путем перевода инвертора параллельного АФ в режим источника напряжения, как это показано в [71].

Авторами в [72, 73] предложен метод управления КKM, позволяющий интегрировать в него функции параллельного АФ, обеспечить стабилизацию выходного напряжения КKM, работу с положительной входной мгновенной активной мощностью и ограничение входного тока инвертора КKM. Система управления работает в условиях отсутствия информации о токах нелинейных нагрузок, подключенных к той же сети.

Суть идеи заключается в изменении алгоритма работы схемы управления ККМ с целью снижения имитируемого входного сопротивления.

С этой целью формирование входного тока ККМ $i_L(t)$ производится в соответствии со схемой замещения, приведенной на рис. 6.2. ККМ по отношению к сети ведет себя как активное сопротивление R_L (аналогично рис. 6.1а), но имеет собственную ЭДС $e_L(t)$, содержащую в своем спектре только первую гармонику частоты питающей сети.

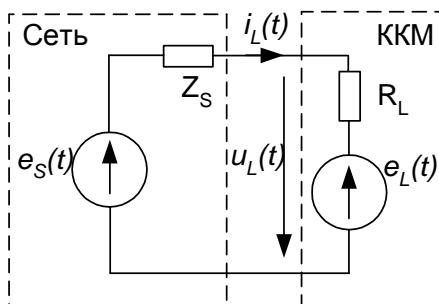


Рис. 6.2 – Схема замещения разработанного ККМ.

Источник ЭДС $e_L(t)$ синхронизирован с помощью петли ФАПЧ с питающей сетью:

$$e_L(t) = E_R \sin \omega t, \quad (6.1)$$

где ω – круговая частота сети, с^{-1} ;

E_R – задание на амплитуду, В.

При этом входной ток ККМ равен

$$i_L(t) = \frac{u_L(t) - e_L(t)}{R_L(E_R, P)}, \quad (6.2)$$

где $R_L(E_R, P)$ – имитируемое входное сопротивление ККМ, Ом.

Величина задания амплитуды E_R выбирается таким образом, чтобы мгновенная активная мощность ККМ была всегда положительной: $i_L(t) \cdot u_L(t) > 0$ (условие корректной работы инвертора ККМ, см. выше), что позволяет использовать разработанный метод управления для практически всех существующих топологий силовой части активных ККМ с прямым управлением входным током.

Величина $R_L(E_R, P)$ определяется из условия баланса мощности (необходимое условие стабилизации выходного напряжения):

$$\frac{\omega}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi/\omega} u_L(t) \frac{u_L(t) - e_L(t)}{R_L(E_R, P)} dt = P, \quad (6.3)$$

где P – потребляемая от сети мощность, Вт.

Цепи формирования сигналов E_R и $R_L(E_R, P)$ не должны допускать быстрых изменений этих параметров.

По сравнению с «классическим» ККМ (рис. 6.1а) получающаяся при той же мощности величина R_L будет меньше. Таким образом, из-за сниженного входного сопротивления ККМ будет оказывать повышенное шунтирующее действие для токов высших гармоник, по аналогии с параллельным активным фильтром.

Структурная схема системы управления, реализующей разработанный метод, приведена на рис. 6.3. Опорный сигнал первой гармоники напряжения сети выделяется с помощью петли ФАПЧ (PLL, рис. 6.3) и вместе с заданием на амплитуду (E_R) подается на перемножитель, выход которого подключен к сумматору-вычитателю, который формирует разностный сигнал $u_L(t) - e_L(t)$. Этот сигнал подается на второй перемножитель, работающий совместно с ПИ-регулятором выходного напряжения ККМ (РН, рис. 6.3), и формирующий сигнал задания входного тока ККМ $i_L(t)$.

Сигнал E_R формируется цепью местной отрицательной обратной связи, содержащей звено с переключаемым в зависимости от полярности входного сигнала коэффициентом передачи и интегратор. Постоянная времени цепи ОС по E_R должна значительно превышать период сетевого напряжения (т.е. E_R не должно значительно изменяться в течение периода).

Узел ограничения тока (ОТ, рис. 6.3) с пороговым звеном уменьшает задание на амплитуду E_R в случае недопустимого повышения входного тока. Поскольку этот ограничитель тока имеет задержку из-за интегратора E_R , быстродействующее аппаратное ограничение тока должно быть также выполнено непосредственно в схеме управления силовым ключом (или ключами).

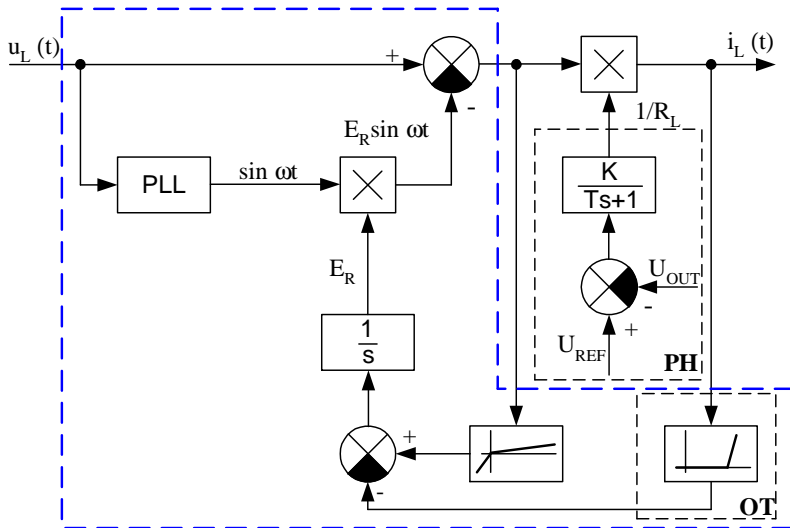


Рис. 6.3 – Структурная схема разработанной системы управления ККМ.

Для повышения быстродействия регуляторов выходного напряжения U_{OUT} и задания на амплитуду E_R возможна установка в цепях обратных связей устройств выборки-хранения (УВХ). Эффект от применения УВХ в цепи ОС по выходному напряжению ККМ (U_{OUT}) описан в [17]. Структурная схема модифицированной системы управления приведена на рис. 6.4.

АЧХ УВХ определяется как [74]:

$$A(\omega) = \left| \frac{1 - e^{-j\omega T}}{j\omega} \right|, \quad (6.4)$$

где T – период дискретизации, с.

АЧХ имеет нули на частотах $\omega = \frac{2\pi k}{T}$, где k – целое число.

Таким образом, в сигнале задания E_R подавлены все гармоники частоты сети, в результате чего он содержит только медленно меняющуюся постоянную составляющую, что и необходимо для корректной работы ККМ. Аналогично в сигнале ОС по U_{OUT} подавлены все четные гармоники частоты сети, что устраняет влияние пульсаций выходного напряжения на спектральный состав входного тока ККМ [17].

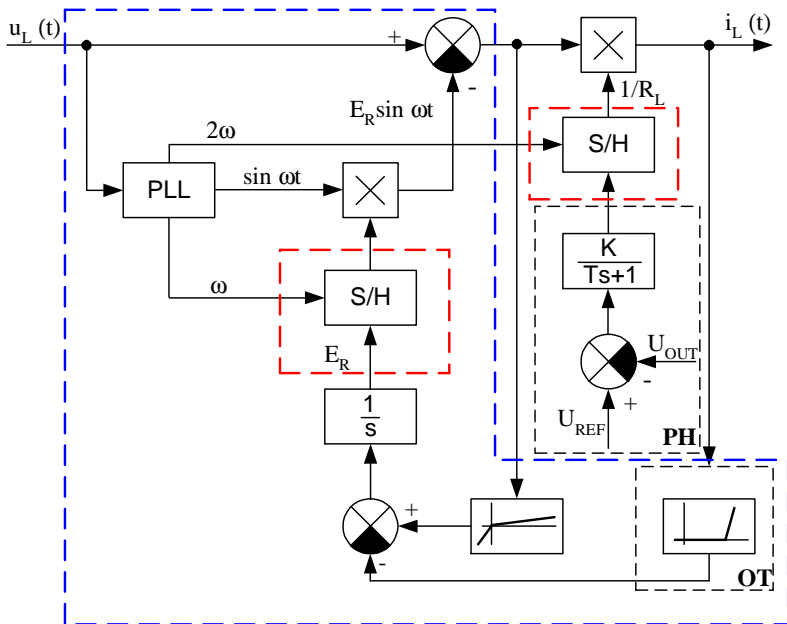


Рис. 6.4 – Структурная схема системы управления ККМ с повышенным быстродействием и улучшенным качеством формирования сигнала задания входного тока.

На рис. 6.5 показан пример эффекта от замены классического ККМ (рис. 6.1а) на ККМ с описанной системой управления. Замена классического ККМ (рис. 6.5а) на ККМ с разработанной авторами системой управления (рис. 6.5б) приводит к повышению общего коэффициента мощности: $PF_2 > PF_1$. Таким образом, коэффициент мощности системы «нелинейная нагрузка + разработанный ККМ» будет выше, чем у системы «нелинейная нагрузка + классический ККМ», несмотря на то, что коэффициент мощности разработанного ККМ будет заметно ниже единицы. Эффект объясняется тем, что в случае, показанном на рис. 6.5б, часть высших гармоник тока нелинейной нагрузки замыкается через ККМ, а не через питающую сеть.

На рис. 6.6 приведены результаты моделирования работы разработанного авторами алгоритма управления ККМ в условиях искаженного напряжения сети (вторичное напряжение подстанции МТП-514 г. Мариуполя 27.01.2011 г. 19:19;

среднеквадратичное напряжение $U_{RMS} = 187 \text{ В}$; $THD_U = 9 \%$ (при этом коэффициент 3-й гармоники составляет $8,2 \%$); потребляемая мощность ККМ $P = 2 \text{ кВт}$ при коэффициенте мощности $PF_K = 0,818$). Следует отметить, что параметры качества напряжения не соответствуют действующему в Украине ГОСТ 13109-97 сразу по нескольким показателям (отклонение напряжения, коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения и коэффициент 3-й гармонической составляющей напряжения).

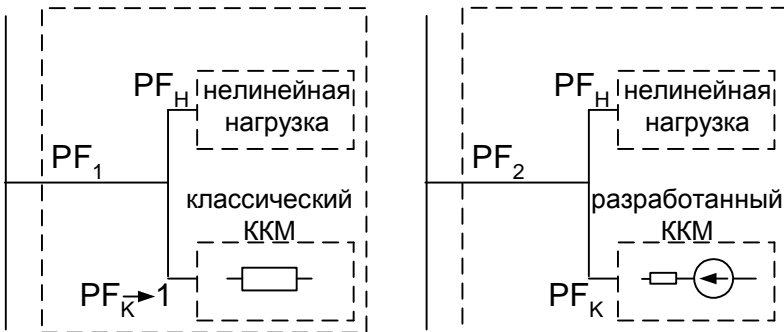


Рис. 6.5 – Применение разработанного ККМ с нелинейной нагрузкой: $PF_2 > PF_1$.

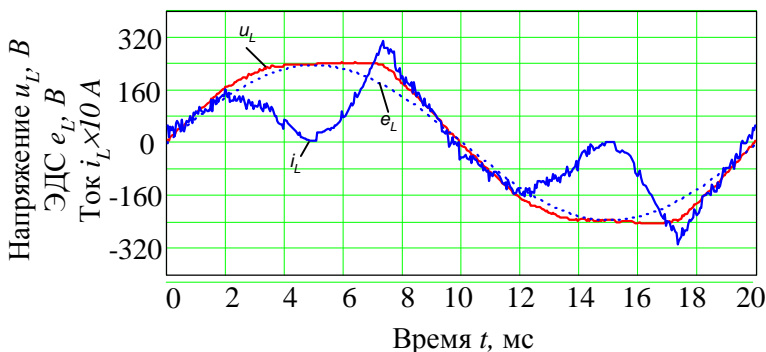


Рис. 6.6 – Диаграмма, иллюстрирующая работу ККМ с разработанной авторами системой управления при искаженном напряжении сети.

Для большей наглядности на рис. 6.7 показаны напряжение сети и входной ток ККМ с отфильтрованной основной гармоникой. Как видно из рис. 6.7, в напряжении сети (u_L) ярко выражены высшие гармоники, вызванные большим количеством нескорректированной выпрямительной нагрузки. ККМ реагирует на такое напряжение появлением высших гармоник входного тока (i_L), причем фазы этих токов противоположны фазам токов, вызвавших искажения формы кривой напряжения.

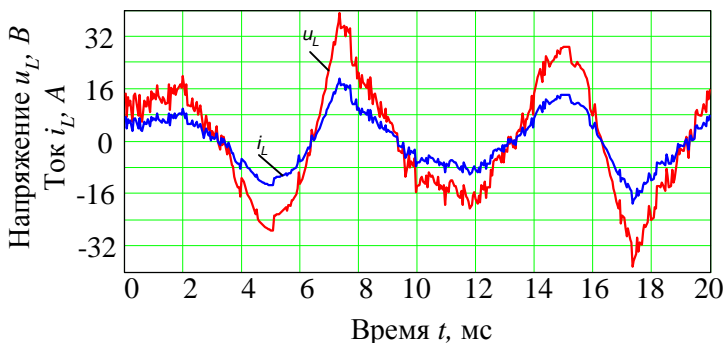


Рис. 6.7 – Напряжение сети и входной ток ККМ с отфильтрованной основной гармоникой.

На рис. 6.8 приведены спектральные составы напряжения питания и входного тока ККМ. Очевидно значительное превышение уровня высших гармоник входного тока над уровнем гармоник напряжения питания ($THD_U = 9,1 \%$, $THD_I = 82,5 \%$). Это вызвано «стремлением» разработанными авторами ККМ увеличить долю мощности, переносимой высшими гармониками. Эта доля мощности может быть определена как

$$P_k^* = 1 - \frac{U_{1m}(U_{1m} - E_R)}{2R_L \cdot P}, \quad (6.5)$$

где U_{1m} – амплитуда первой гармоники напряжения сети, В.

Так, для приведенного случая 7,9 % мощности нагрузки обеспечиваются высшими гармониками напряжения. В то время как при чисто активной нагрузке (ККМ рис. 6.1а) эта доля будет определяться как $1 - \frac{1}{1 + THD_U^2}$, что для рассматриваемого

случая составляет всего 0,8 %, а для случая ККМ рис. 6.16 мощность, потребляемая на высших гармониках напряжения, равна нулю.

Эффект повышения доли мощности высших гармоник связан с уменьшением входного сопротивления ККМ R_L . В рассматриваемом случае разработанный ККМ работает с параметрами $E_R = 235$ В, $R_L = 2,03$ Ом. В то же время «классический» ККМ (рис. 6.1а) имел бы в аналогичных

условиях $R_L = \frac{U_{RMS}^2}{P}$, что составляет 17,48 Ом.

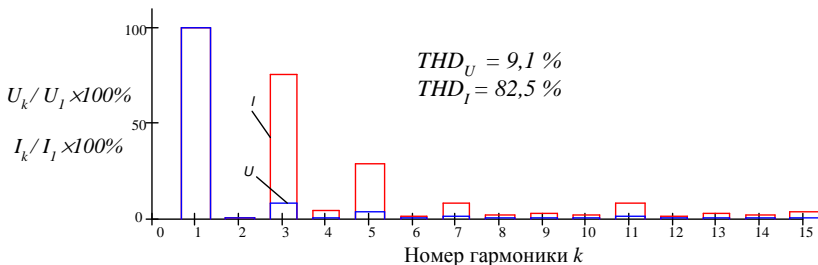


Рис. 6.8 – Спектральный состав входных напряжения и тока ККМ. Уровень первой гармоники принят за 100 %.

В случае «чистой» сети (при незначительном уровне высших гармоник напряжения) работа разработанного ККМ полностью аналогична «классическому», т.е. в спектре входного тока будет присутствовать только первая гармоника.

Для экспериментального подтверждения теоретических результатов был создан модифицированный ККМ на базе микросхемы МС33262 (рис. 6.9), в котором цепь обработки мгновенного напряжения сети была изменена для реализации функции активной фильтрации с возможностью ее отключения.

Измерение параметров качества электроэнергии и осциллографирование напряжений и токов производилось с помощью разработанного авторами анализатора качества электроэнергии, описание которого приведено в следующей главе этой книги.

ККМ работал совместно с нелинейной нагрузкой, представляющей собой мостовой выпрямитель со сглаживающим конденсатором 330 мкФ, нагруженный на

активное сопротивление, и потребляющей мощность 100 Вт при напряжении сети 193 В.



Рис. 6.9 – Внешний вид экспериментального ККМ.

Мощность нагрузки ККМ составляла 140 – 160 Вт.

На рис. 6.10 и 6.11 приведены осциллограммы сетевого напряжения и тока при отключенной и включенной функции активной фильтрации соответственно. Для удобства представления выполнена нормировка на амплитуду.

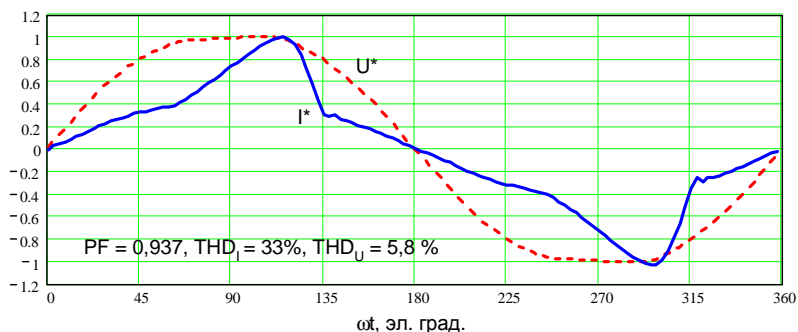


Рис. 6.10 – ККМ имитирует активное сопротивление.

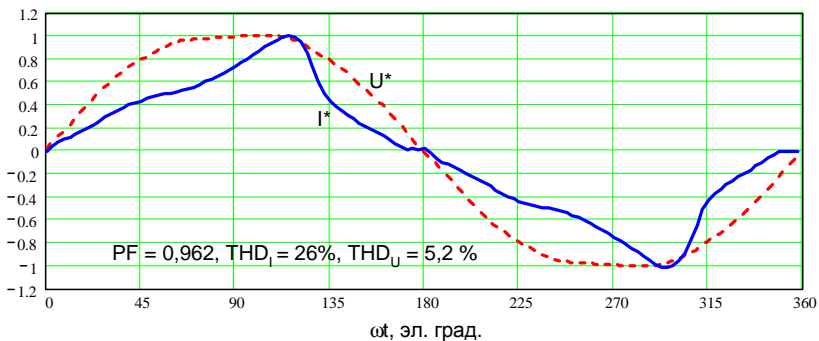


Рис. 6.11 – ККМ в режиме активной фильтрации.

Как видно из представленных осциллограмм, включение функции активной фильтрации в ККМ привело к повышению КМ с 0,937 до 0,962; снижению THD_I с 33 % до 26 % и снижению THD_U с 5,8 % до 5,2 %, что подтверждает работоспособность описанного способа управления активным ККМ.

Таким образом, разработанный авторами метод управления активным ККМ позволяет ограниченно интегрировать в него функции параллельного активного фильтра без датчиков тока, что приводит к улучшению спектрального состава напряжения питающей сети. Метод может быть применен для практически всех известных топологий ККМ, в которых реализовано прямое управление входным током.

Дальнейшим направлением исследований является создание аналогичных методов и систем управления для 3-фазных активных ККМ, а также для источников питания с непосредственным преобразованием [54, 58, 63], что позволит повысить качество электроэнергии и улучшить условия работы иных нагрузок, подключенных к той же сети.