

* * *

Активный фильтр для подавления неактивных составляющих сетевого тока выпрямителей с емкостным фильтром

ЧАПЛЫГИН Е.Е.

Рассмотрены способы повышения коэффициента мощности выпрямителей (или группы выпрямителей) с емкостным фильтром при применении активного параллельного фильтра на базе инвертора напряжения. Определена связь перечня корректируемых неактивных гармонических составляющих и коэффициента мощности системы «выпрямитель – активный фильтр». Рассмотрен гармонический состав напряжения инвертора на стороне переменного тока при формировании полигармонической широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Приведен способ выбора индуктивности реактора активного фильтра, рассмотрена форма сетевого тока и его спектр в системе «выпрямитель – активный фильтр». Определены особенности формирования однополярной и двухполярной ШИМ и выбора частоты коммутации ключей активного фильтра.

Ключевые слова: выпрямитель, коэффициент мощности, активный фильтр, широтно-импульсная модуляция

Одной из актуальных задач силовой электроники является повышение коэффициента мощности преобразователей и снижение кондуктивных искажений питающей сети. Данная задача наиболее эффективно решается двумя способами [1, 2]: применением сетевых преобразователей с активной коррекцией коэффициента мощности и использованием активных или гибридных сетевых фильтров. Второй способ необходимо применять в тех случаях, когда нелинейная нагрузка подключается к сети непосредственно, без преобразовательных устройств, либо в случае подключения к сети преобразователей, не использующих коррекцию коэффициента мощности. Подобные источники широко

применяются для питания радиоэлектронной аппаратуры, устройств бытовой техники и т.п. Упомянутые устройства, в которых широко используются бестрансформаторные однофазные выпрямители с емкостным фильтром, потребляющие сетевой ток короткими импульсами, оказывают неблагоприятное влияние на питающую сеть. Несмотря на относительно малую мощность отдельных выпрямителей, работа группы таких преобразователей приводит к заметным кондуктивным искажениям формы напряжения питающей сети.

В статье рассматривается компенсация неактивных составляющих сетевого тока однофазных выпрямителей с С-фильтром (или группы таких вы-

прямителей) при применении параллельных активных сетевых фильтров, выполненных на базе инверторов напряжения [1, 2].

Схема подключения активного фильтра к выпрямителю приведена на рис. 1. Для компенсации совокупности неактивных составляющих сетевого тока выпрямителя сетевой фильтр должен сформировать сетевой ток того же значения и той же формы, но противоположного знака. Для этого на стороне переменного тока активного фильтра формируется полигармоническая ШИМ-последовательность напряжения. К реактору L прикладывается разность сетевого напряжения u_c и напряжения ШИМ-последовательности u_ϕ . Пренебрегая высшими гармониками напряжения сети, можно считать, что при $k > 1$ для формирования k -й гармоники тока фильтра с амплитудой $I_{\phi km}$ амплитуда k -й гармоники напряжения ШИМ-последовательности должна равняться

$$U_{\phi km} = I_{\phi km} L k \omega_c \tag{1}$$

Из этого следует, что для подавления высокочастотных гармоник сетевого тока выпрямителя значение соответствующих гармоник u_ϕ должно быть существенным. Это обуславливает особенности процессов формирования напряжений и токов в активном фильтре, предназначенном для компенсации неактивных составляющих сетевого тока выпрямителей с C -фильтром.

Анализ сетевого тока выпрямителей с C -фильтром. В [3] рассмотрены электромагнитные процессы в бестрансформаторных выпрямителях с C -фильтром и определены значение коэффициента мощности и гармонический состав сетевого тока. В настоящей работе использованы методы расчета, предложенные автором данной публикации.

При работе выпрямителя с C -фильтром преобразователь потребляет ток от сети короткими им-

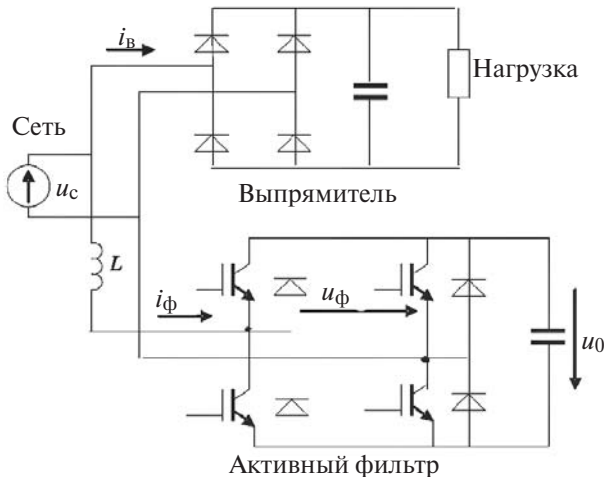


Рис. 1. Система «выпрямитель с C -фильтром – активный фильтр»

пульсами, лежащими в окрестности амплитудных значений модуля напряжения сети. На рис. 2,а приведен спектр сетевого тока выпрямителя при коэффициенте пульсации на стороне постоянного тока $q=6\%$, штриховой линией показана огибающая спектра сетевого тока при $q=4\%$, штрихпунктирной — при $q=2\%$.

Составляющие спектра измеряются в амперах. Во всех случаях мощность нагрузки 500 Вт. Диаграммы показывают, что спектр содержит интенсивные нечетные гармонические составляющие, амплитуда которых уменьшается при увеличении номера гармоники k тем меньше, чем выше качество выходного напряжения на выходе выпрямителя. Интенсивные высшие гармонические составляющие обуславливают низкие значения коэффициентов мощности s и основной гармоники сетевого тока n при $q=6\%$ — $n=0,5$, $\cos j = 0,954$; при $q=4\%$ — $n=0,451$, $\cos j = 0,968$; при $q=2\%$ — $n=0,378$, $\cos j = 0,983$.

Питание от сети группы выпрямителей с C -фильтром приводит к векторному сложению гармонических составляющих. При одинаковых коэффициентах пульсации всех выпрямителей все гармоники возрастают пропорционально мощности группы преобразователей; при различном качестве

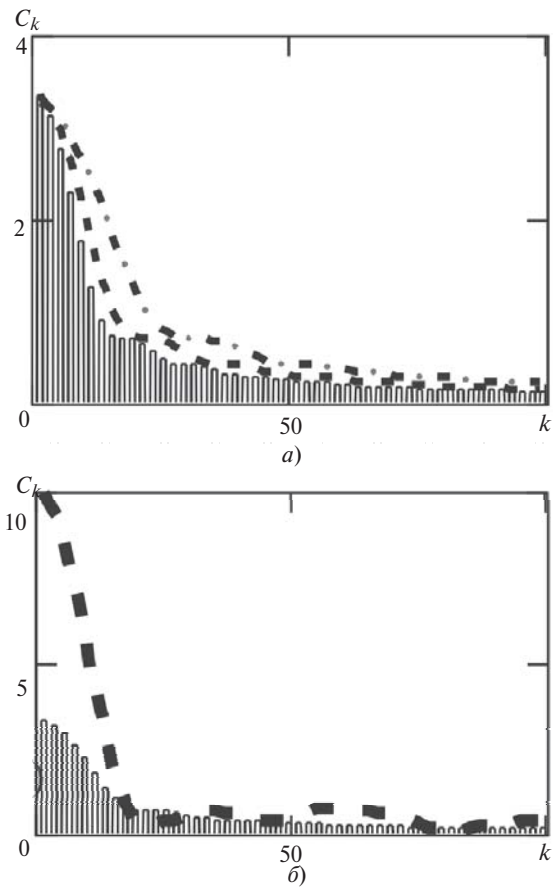


Рис. 2. Спектры сетевого тока выпрямителя с C -фильтром и группы выпрямителей

напряжения на выходе выпрямителей изменение амплитуды гармоник неоднозначно. На рис. 2,б приведен спектр сетевого тока выпрямителя i_B при коэффициенте пульсации на стороне постоянного тока $q=6\%$, штриховой линией показана огибающая спектра сетевого тока при работе от сети трех выпрямителей с C -фильтром, мощность каждого из них 500 Вт, а коэффициенты пульсации соответственно $q=2; 4$ и 6% . Из диаграммы можно заключить, что амплитуда гармоник, кратных частоте сети, значительна.

Применение активного сетевого фильтра позволяет ослабить гармоники сетевого тока, кратные частоте сети, вплоть до полного подавления (принцип селективного исключения гармоник). В табл. 1 приведены значения коэффициентов основной гармоники системы «выпрямитель – активный фильтр» (или группа активных выпрямителей) при различных коэффициентах пульсации q и различном перечне исключаемых гармоник.

Таблица 1

Значение q	Перечень подавляемых гармоник сетевого тока k				
	3, 9	3, 19	3, 29	3, 39	3, 49
0,02	0,52	0,68	0,774	0,829	0,861
0,04	0,68	0,815	0,874	0,905	0,926
0,06	0,771	0,868	0,911	0,935	0,95
Группа выпрямителей	0,834	0,943	0,946	0,956	0,96

Данные таблицы позволяют заключить:

для повышения коэффициента мощности выпрямителей с C -фильтром активный фильтр должен подавлять широкий спектр гармоник;

выпрямители с высоким качеством и малым значением коэффициента пульсации выходного напряжения имеют меньший коэффициент мощности;

группа выпрямителей соизмеримой мощности с различными значениями коэффициента пульсации имеет более высокие значения коэффициента мощности при том же перечне гармоник, исключаемых за счет функционирования активного фильтра. Поэтому подавление высших гармоник в группе выпрямителей более эффективно, чем при подключении активного фильтра к одиночному выпрямителю.

Анализ системы «выпрямитель – активный фильтр» по усредненной составляющей. Рассмотрим управление активным фильтром, основанное на селективном исключении гармоник в сетевом токе

системы «выпрямитель–активный фильтр». Анализ по усредненной составляющей сводится к замене мгновенных значений напряжения и тока огибающей их усредненных на межкоммутационном интервале значений. Высшие гармоники с частотами вблизи и выше частоты коммутации при этом игнорируются. Усредненные значения величин маркируем значком $*$.

Рассмотрим идеальную питающую сеть напряжением $u_c = \sqrt{2}U_c \sin(\omega t)$. Пренебрегаем потерями в схеме активного фильтра, считая ключи идеальными. Сетевой ток активного фильтра формируется за счет приложения к реактору L разности напряжений u_c и u_{ϕ} (рис. 1). Для исключения влияния напряжения сети на сетевой ток активного фильтра в напряжении u_{ϕ}^* должна присутствовать компенсирующая первая гармоника, равная u_c . Для подавления неактивных составляющих тока выпрямителя с C -фильтром активный фильтр на стороне переменного тока должен формировать напряжение в соответствии с (1), тогда напряжение u_{ϕ}^* описывается выражением:

$$u_{\phi}^* = u_c + L2\pi f_c k_1^i A_1 \cos \omega t + \frac{p \ddot{u}}{2\omega} + \sum_{k=3}^N \frac{A_k}{\omega} \cos k\omega t + \frac{p \ddot{u}}{2\omega} + B_k \sin k\omega t + \frac{p \ddot{u}}{2\omega} \quad (2)$$

где $k=1,3,\dots,N$; N – наибольший номер гармоники, которая подавляется фильтром; A_k, B_k – амплитуды косинусной и синусной k -й гармоник разложения в ряд Фурье тока выпрямителя i_B ; L – индуктивность реактора; f_c – частота сети.

Значение L выбирается в режиме формирования выпрямителем максимальных неактивных токов таким образом, чтобы амплитуда напряжения $u_{\phi}^* \leq 0,9U_0$, что обеспечивает надежность коммутации транзисторов инвертора, а для наиболее полного использования напряжения U_0 следует приравнять $u_{\phi}^* = 0,9U_0$. Поскольку напряжение u_{ϕ}^* содержит составляющую u_c , напряжение $U_0 > \sqrt{2}U_{c \max} = 1,1U_{c \text{ ном}}$. При увеличении U_0 возрастают амплитуда гармонических составляющих напряжения u_{ϕ}^* и значение индуктивности L ; при снижении U_0 уменьшаются индуктивность, а также амплитуда составляющих напряжения u_{ϕ}^* , что усиливает чувствительность работы активного фильтра к электромагнитным помехам. Поэтому значение U_0 выбирается из компромиссных соображений, но в любом случае оно должно быть существенно больше $\sqrt{2}U_{c \max}$. При этом активный фильтр должен выполняться на IGBT-транзисторах, использование полумостового инвертора в схеме рис. 1 нецелесообразно из-за значительного уве-

личения напряжения на транзисторах. На рис. 3,а для примера показана форма напряжения u_{Φ}^* при $N=49$, построенная в соответствии с (2).

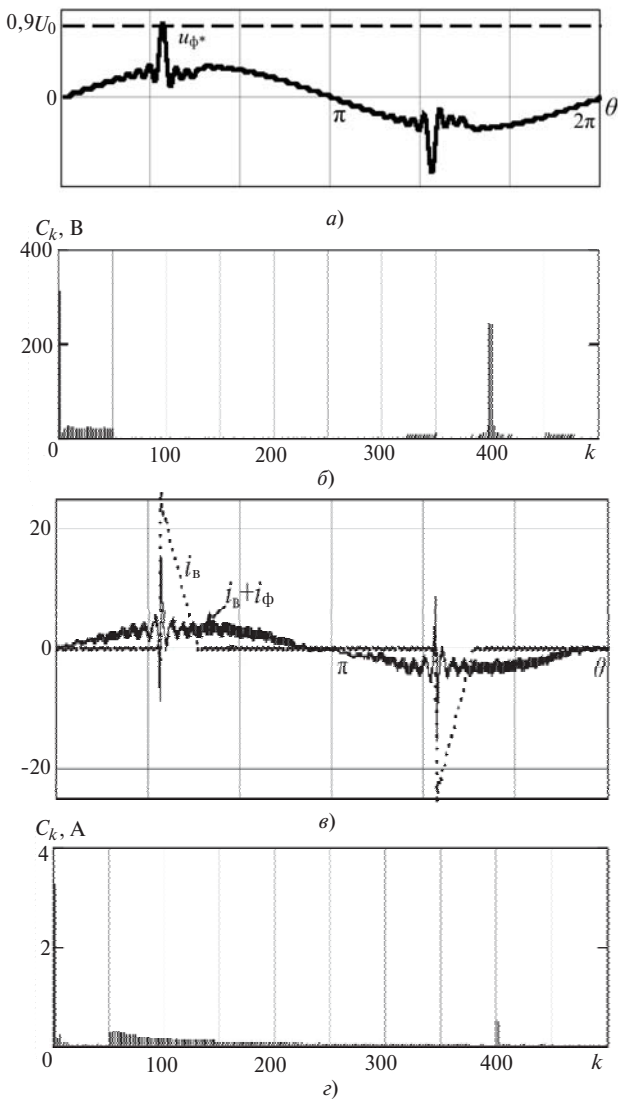


Рис. 3. Временные диаграммы напряжения u_{Φ} и тока $i_b + i_{\Phi}$ в системе «выпрямитель – активный фильтр» и их спектры

Следует отметить, что принятая выше идеализация напряжения сети некорректна. Допустимые ГОСТ [4] высшие гармоники напряжения сети по значению могут быть больше формируемых инвертором гармонических составляющих u_{Φ} , и для устранения их влияния система управления активным фильтром должна содержать широкополосную обратную связь по току. При этом формируемые инвертором гармоники могут превышать значения, задаваемые (2). В этом случае на амплитуду u_{Φ}^* должен быть введен запас: увеличено напряжение U_0 или уменьшена индуктивность L .

Анализ электромагнитных процессов на спектральной модели. Использование усредненных моделей при исследовании преобразователей с ШИМ приводит к существенным погрешностям. Для бо-

лее детального исследования процессов в системе «выпрямитель – активный фильтр» избрано спектральное моделирование [5]. Высокая производительность спектральных моделей позволяет осуществить модельный эксперимент во множестве режимов при различных параметрах устройства. Результаты моделирования при компенсации неактивных составляющих выпрямителя мощностью 500 Вт ($q=4\%$) приведены на рис. 3, $U_0=800$ В, $L=4$ мГн, частота коммутации 20 кГц.

Моделировались различные виды ШИМ: одно- и двухполярная; с модуляцией фронта (или среза) и импульса и двухсторонняя ШИМ с модуляцией и фронта, и среза; ШИМ-2 и ШИМ-1. При формировании ШИМ по синусоидальному закону спектр напряжения на стороне переменного тока содержит основную гармонику и комбинационные составляющие, значения частот которых близки к частотам, кратным частоте коммутации. При этом интенсивность комбинационных гармоник не зависит от частоты коммутации, выбора ШИМ по фронту (среза) или двухсторонней ШИМ, ШИМ-1 или ШИМ-2, но при формировании двухполярной ШИМ значительно выше, чем при однополярной [5]. Несмотря на формирование инвертором активного фильтра ШИМ по полигармоническому закону, гармонические составляющие с частотами, кратными частоте сети, значительно меньше основной гармоники (см. выражение (2)), поэтому изменение высокочастотной части спектра напряжения u_{Φ} незначительно (спектр напряжения u_{Φ} приведен на рис. 3,б). На рис. 3,в представлена форма сетевых токов системы «выпрямитель – активный фильтр» (сплошная линия) и выпрямителя (пунктирная), на рис. 3,г — спектр сетевого тока системы «выпрямитель – активный фильтр».

Использование полигармонической ШИМ-последовательности обуславливает существенные особенности формирования низкочастотной части спектра u_{Φ} . Формирование гармоник, кратных частоте сети, оказывает влияние на значения других гармоник ШИМ-последовательности, в том числе первой, что обуславливается дискретным характером формирования напряжения. Ниже приведены значения составляющей основной гармоники, обусловленные взаимодействием гармоник, при различных значениях N :

N	3	5	9	19	29	39	49
$C_{\Phi 1}/C_{ст}, \%$	0,27	0,24	0,2	0,3	0,15	0,14	0,21

Видим, что приведенные значения имеют вероятностный характер, влияние различных гармоник на составляющую спектра с частотой сети в ряде режимов взаимно компенсируется. Несмотря на

малые значения напряжений в соответствии с (1) в сетевом токе активного фильтра появляются значительные составляющие первой гармоники. Например, при $N=49$, $U_0=800$ В амплитуда этой составляющей достигает 0,5 А, при этом амплитуда первой гармоники тока выпрямителя равна 3,2 А.

В реальных преобразователях контур обратной связи, стабилизирующий значение U_0 , подавляет указанную паразитную составляющую, в результате сетевой ток активного фильтра содержит только активную составляющую тока первой гармоники, необходимую и достаточную для компенсации мощности активных потерь в активном фильтре. При спектральном моделировании также формируется компенсирующая составляющая напряжения u_ϕ , активная составляющая тока первой гармоники равна нулю, поскольку активные потери в фильтре не учитываются.

В табл. 2 приведены полученные при спектральном моделировании значения коэффициента мощности системы «выпрямитель – активный фильтр» при различных видах ШИМ и значениях U_0 ; приведены также значения индуктивности L . Мощность выпрямителя 500 Вт, $q=4\%$, $N=49$, частота коммутации 20 кГц.

Таблица 2

U_0 , В	L , мГн	Двухполярная ШИМ		Однополярная ШИМ	
		ШИМ-2	ШИМ-1	ШИМ-2	ШИМ-1
800	4	0,883	0,853	0,886	0,871
600	2,3	0,857	0,846	0,855	0,853
450	1	0,72	0,771	0,698	0,761

Данные табл. 2 позволяют заключить:

при формировании однополярной и двухполярной ШИМ не отмечается преимуществ первой, что свидетельствует о том, что значения коэффициента мощности слабо зависят от интенсивности комбинационных гармоник в напряжении u_ϕ , а определяются составляющими тока, генерируемыми выпрямителем;

как видно, в спектре рис. 4,в содержатся составляющие, которые входят в перечень исключаемых гармоник, кратных частоте сети, $k < N$. Это связано с отмеченным выше взаимовлиянием гармоник и подтверждается тем, что в спектре тока наиболее интенсивно проявляются гармоники относительно низкой частоты в соответствии с (1);

в результате этого коэффициенты мощности системы «выпрямитель–активный фильтр» имеют значения с меньше приведенного в табл. 1 значения $s=0,926$;

взаимовлияние гармоник проявляется сильнее при снижении напряжения U_0 ;

различие значений с при реализации ШИМ-1 и ШИМ-2 имеет неоднозначный характер. Поскольку коэффициент мощности зависит от взаимовлияния гармоник, которое имеет вероятностный характер, влияние на с выбора ШИМ-1 или ШИМ-2 также имеет вероятностный характер.

В реальных преобразователях спектральный состав тока активного фильтра или системы «выпрямитель – активный фильтр» корректируется широкополосной обратной связью по току. За счет этого коэффициент мощности может быть повышен и в пределе достигнуть $s=0,926$. Очевидно, в инверторах с более высокими значениями напряжения U_0 такая коррекция более эффективна.

Увеличение перечня исключаемых из спектра сетевого тока гармоник ограничено дискретным характером формирования напряжения в активном фильтре: как показано в [6], граничная частота регулирования при формировании широтно-импульсной модуляции равна 1/3 частоты коммутации. Реально возможности расширения полосы пропускания цепей обратной связи еще меньше. Увеличение частоты коммутации ограничено ухудшением гармонического состава, в первую очередь за счет усиления влияния процессов в течение «мертвой» паузы. Наличие в спектре напряжения u_ϕ даже незначительных низкочастотных составляющих искажения в соответствии с (1) может вызвать появление значительных гармоник в спектре сетевого тока.

Показатели качества сетевого тока активных фильтров в значительной степени определяются работой системы управления. Принципы построения систем управления активных фильтров и выпрямителей с активной коррекцией коэффициента мощности схожи, однако в случае активных фильтров задача усложняется необходимостью реализации широкополосной обратной связи по сетевому току. Наряду с сетевыми фильтрами, реализующими синхронную ШИМ с постоянной частотой коммутации, представляют интерес системы с переменной частотой коммутации, в частности управление по принципу d-модуляции. Построение системы управления в таких случаях значительно упрощается. При работе системы управления вычисляется активная составляющая основной гармоники тока выпрямителя i_B с амплитудой B_{B1} и формируется эталонный ток $i_{эт} = B_{B1} \sin(\omega t)$. Коммутация ключей активного фильтра осуществляется в моменты, когда сетевой ток системы «выпрямитель – активный фильтр» ($i_B + i_\phi$) отклоняется от значения эталонного тока в ту или иную сторону на величину D.

На рекуррентной модели активного фильтра с d -модуляцией получены результаты в том же режиме, что и графики на рис. 3. Средняя частота коммутации 20 кГц, $D=1,6$ А, $U_0=800$ В, $L=4$ мГн. Выбор параметра D позволяет регулировать среднюю частоту коммутации. На рис. 4,а представлена форма сетевых токов системы «выпрямитель – активный фильтр» (сплошная линия) и выпрямителя (пунктирная). На рис. 4,б показан спектр сетевого тока системы «выпрямитель – активный фильтр». В отличие от формирования алгоритма переключения по принципу селективного исключения гармоник в системах с d -модуляцией происходит воздействие на все неактивные составляющие сетевого тока системы. Коэффициент мощности системы $s=0,823$. При $LD=\text{const}$ среднее значение частоты коммутации не изменяется. При уменьшении D и сохранении среднего значения частоты коммутации в спектре сетевого тока системы «выпрямитель – активный фильтр» возрастают наиболее низкочастотные составляющие, но ослабевают гармоники более высоких частот. Коэффициент мощности изменяется слабо.

Применение активных фильтров для подавления неактивных составляющих сетевого тока выпрямителей с C -фильтром позволяет существенно повысить коэффициент основной гармоники n и коэффициент мощности s системы «выпрямитель – активный фильтр». Например, в режиме, представленном на рис. 3, выпрямитель с C -фильтром имеет коэффициент мощности $s=0,435$, а в системе «выпрямитель – активный фильтр» значение $s=0,886$. Однако замена выпрямителей с C -фильтром на выпрямительные устройства с активной

коррекцией коэффициента мощности позволяет добиться заметно больших его значений.

Выводы. 1. Для эффективного повышения коэффициента мощности в системе «выпрямитель с C -фильтром (или группа выпрямителей) – активный фильтр» необходимо подавление широкого перечня гармоник, кратных частоте сети, при этом активный фильтр должен формировать полигармоническую ШИМ-последовательность напряжения u_{Φ} на стороне переменного тока.

2. При реализации ШИМ в спектре напряжения u_{Φ} гармоники, кратные частоте сети, влияют на фазу и амплитуду других гармоник, при этом малые по значению низкочастотные составляющие спектра u_{Φ} могут вызвать формирование активным фильтром значительных гармоник тока.

3. Определен алгоритм выбора индуктивности реактора L активного фильтра, значение которой не зависит от частоты коммутации.

4. Основной вклад в снижение коэффициента мощности вносят не комбинационные гармоники, генерируемые активным фильтром, а гармонические составляющие сетевого тока выпрямителя, которые не подавляются активным фильтром. Поэтому значения коэффициента мощности системы «выпрямитель – активный фильтр» при реализации двухполярной и однополярной ШИМ практически одинаковы.

5. Эффективность повышения коэффициента мощности в значительной степени зависит от эффективности работы широкополосных обратных связей по сетевому току. Граничная частота цепей обратной связи жестко связана с выбором частоты коммутации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розанов Ю.К., Рябчицкий М.В., Кваснюк А.А. Силовая электроника: Учебник для вузов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007, 632 с.
2. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники: Учеб. пособие, изд. 5-е. – М.: Изд-во «Юрайт», 2012, 672 с.
3. Попков О.З., Чаплыгин Е.Е. Расчет выпрямителей с емкостным фильтром. – Практическая силовая электроника, 2007, вып. 25, с. 15–19.
4. ГОСТ Р 54149-2010. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2011, 16 с.
5. Чаплыгин Е.Е. Инверторы напряжения и их спектральные модели: Учеб. пособие. – М.: Изд-во МЭИ, 2003, 64 с.
6. Чаплыгин Е.Е., Вилков А.Е. Исследование коэффициента передачи инвертора напряжения с широтно-импульсной модуляцией. – Электричество, № 8, 2010, с. 52–59.

[21.10.14]

Автор: Чаплыгин Евгений Евгеньевич окончил радиотехнический факультет Московского энерге-

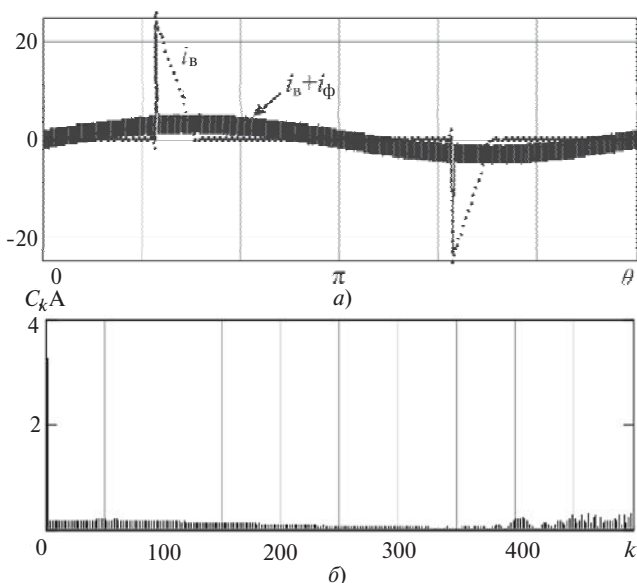


Рис. 4. Временная диаграмма тока $i_B + i_{\Phi}$ в системе «выпрямитель – активный фильтр» и спектр тока при управлении по принципу d -модуляции

тического института (МЭИ) в 1965 г. В 1974 г. защитил кандидатскую диссертацию «Исследование непосредственных преобразователей частоты с

замкнутым контуром управления». Профессор кафедры промышленной электроники МЭИ.

Elektrichestvo (Electricity), 2015, No. 4, pp. 38–44.

An Active Filter for Suppressing Nonactive Components in the Network Current of Rectifiers with a Capacitive Filter

E.E. CHAPLYGIN

Methods for improving the power factor of rectifiers (or a group of rectifiers) with a capacitive filter through the use of an active parallel filter constructed on the basis of a voltage inverter are considered. The correlation between the list of corrected inactive harmonic components and the power factor of the «rectifier - active filter» system is determined. The harmonic composition of the inverter voltage on the AC side is considered for the case of setting up polyharmonic pulse width modulation (PWM). A method for selecting the active filter reactor's inductance is presented, and the network current waveform and spectrum in the «rectifier - active filter» system are considered. The specific features of shaping unipolar and bipolar PWM and selecting the commutation frequency of active filter switches are determined.

Key words: *rectifier, power factor, active filter, pulse-width modulation*

REFERENCES

1. **Rozanov Yu.K., Ryabchitskii M.N., Kvasnyuk A.A.** *Silovaya elektronika* (Power Electronic Engineering). Moscow, Publ. «House MPEI», 2007, 632 p.
2. **Zinov'yev G.S.** *Osnovy silovoi elektroniki* (Power Electronic Engineering Principles). Moscow, Publ. «Yurait», 2012, 672 p.
3. **Popkov O.Z., Chaplygin E.E.** *Prakticheskaya silovaya elektronika – in Russ. (Practical Power Electrical Engineering)*, 2007, iss. 25, pp. 15–19.
4. **Gost R 54149.** *Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva*

elektricheskoi energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya (GOST R 54149-2010: Electric Energy. Electromagnetic Compatibility of Technical Equipment. Power Quality Limits in the Public Power Supply Systems). Moscow, Publ. «Standartinform», 2011, 16 p.

5. **Chaplygin E.E.** *Invertory napryazheniya i ikh spectral'nye modeli* (Voltage Inverters and Spectrum Models). Moscow, Publ. of the Moscow Power Engineering Institute, 2003, 64 p.

6. **Chaplygin E.E., Vilkov A.E.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2010, No. 8, pp. 52–59.

Author: Chaplygin Evgenii Evgen'yevich (Moscow, Russia) – Cand. Sci. (Eng.), Professor, Moscow Power Engineering Institute.

