

Расчёт выходного фильтра ШИМ-инвертора

Александр Захаров (г. Томск)

Разработана методика расчёта параметров выходного фильтра на заданный коэффициент гармоник напряжения на нагрузке. Приведён пример расчёта Г-образного LC-фильтра мостового инвертора, реализующего равномерную многократную однополярную широтно-импульсную модуляцию (ШИМ) по синусоидальной функции построения, с применением необходимых формул и иллюстрацией характерных графиков и диаграмм.

В наше время бурного развития силовой преобразовательной техники в современном бытовом приборе уже трудно представить себе линейный блок питания. Например, современный телевизор, в отличие от предшественника, имевшего громоздкий вторичный источник питания (ВИП), оснащён импульсным многоканальным ВИП несравнимо меньшей массы и габаритов, но с большими возможностями. Частота преобразования энергии стала намного выше стандартных 50 Гц и с развитием элементной базы постоянно повышается.

Конечно, нельзя утверждать, что импульсная силовая электроника полностью вытеснила линейную (например, высококачественные УМЗЧ комплектуются только линейными источниками питания, так как импульсные ВИП имеют недопустимый для устройств такого класса уровень помех), но, несомненно, заняла доминирующее положение.

Современные DC/AC-преобразователи (инверторы) строятся с применением высокочастотных импульсных схем, что позволяет при помощи системы управления регулировать напряжение и частоту выходного сигнала, а также его форму. Подобные принципы построения DC/AC-преобразователей применяют практически везде, где требуется преобра-

зование энергии, например, для питания бытовых приборов от химических источников тока, на транспортных средствах или как часть источников бесперебойного питания для ответственных компьютерных и телекоммуникационных систем, медицинской техники или для создания приводов управления электрическими двигателями.

В статье мы рассмотрим автономные инверторы напряжения с синусоидальной формой выходного сигнала, как наиболее часто востребованной. Обычно такой сигнал формируется средствами ШИМ при помощи изменения ширины импульса в течение периода, так чтобы после фильтрации получить требуемую амплитуду выходного напряжения в каждый заданный момент. Из-за дискретности преобразования сигнал получается не идеально сглаженным, т.к. в нём присутствуют гармонические ВЧ-составляющие. Поэтому мы и заострим внимание на вопросе фильтрации ВЧ-составляющих на выходе инверторов, от которых требуется получение строго синусоидального напряжения с заданным коэффициентом гармоник.

В технической литературе достаточно широко и полно описаны алгоритмы расчёта выходных фильтров выпрямителей на заданный коэффициент пульсаций напряжения на нагрузке с приведением необходимых формул и соотношений к ним. А вот с методикой расчёта выходных фильтров инверторов на заданный коэффициент гармоник напряжения познакомиться довольно сложно. Сталкиваясь с подобной проблемой, разработчики электронной техники

в основном решают её опытным путём.

Хотя экспериментальные данные наиболее правдиво отражают сложившуюся ситуацию, но постановка и проведение эксперимента – трудоёмкий и кропотливый процесс, требующий, кроме того, и дополнительных финансовых затрат. Аналитическое решение – также довольно трудоёмкая задача, требующая времени и не гарантирующая получение положительного результата. Что же делать? Предлагаю воспользоваться вторым путём – решить проблему аналитически с некоторыми упрощениями и допущениями, перекладывая все сложные математические расчёты на «плечи» ЭВМ, а первый способ применить как проверку результатов.

Суть предлагаемого метода заключается в раскладывании формы напряжения на выходе инвертора при помощи алгоритма прямого быстрого преобразования Фурье (ПБПФ) в спектр амплитуд гармонических составляющих, «пропускания» через фильтр каждой составляющей в отдельности и последующего восстановления сигнала на выходе фильтра посредством обратного быстрого преобразования Фурье (ОБПФ). В итоге мы получаем метод, основанный только на БПФ, результат применения которого хоть и не будет сверхточным, но, тем ни менее, сможет дать представление об основных параметрах фильтра. При этом можно получить не только форму кривой напряжения на нагрузке, а следовательно, определить коэффициент гармоник, действующие значения напряжений первой и высших гармонических составляющих, но и вычислить фазовый сдвиг, обусловленный влиянием фильтра.

И всё же, каким бы простым не казалось решение поставленной задачи, данный метод имеет некоторые нюансы. Для его реализации необходимо хотя бы представлять форму выходного напряжения инвертора и получить коэффициент передачи

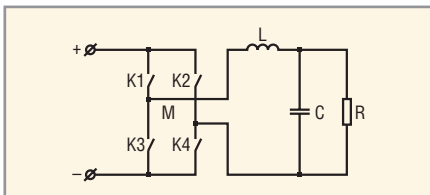


Рис. 1. Структурная схема преобразователя

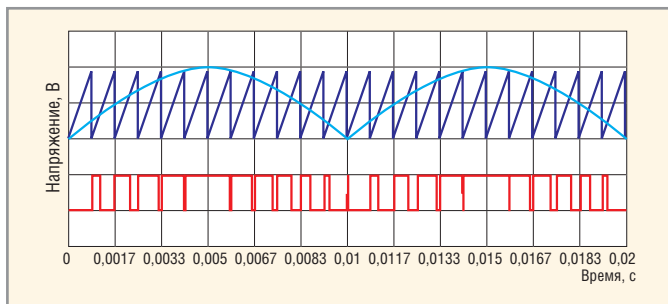


Рис. 2. Импульсы по синусоидальной функции построения

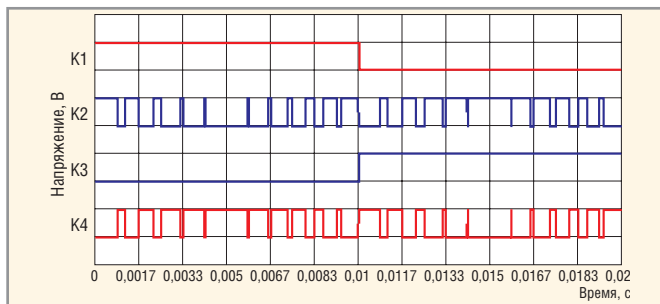


Рис. 3. Импульсы управления ключами инвертора

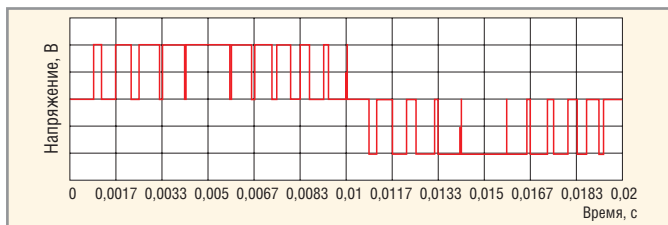


Рис. 4. Форма выходного напряжения инвертора

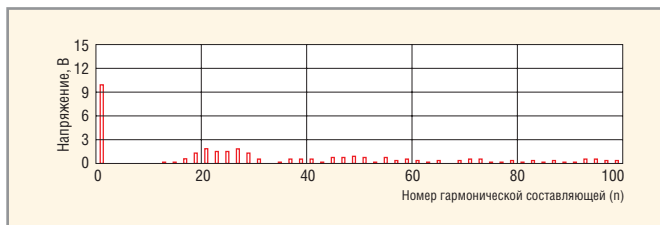


Рис. 5. Спектр амплитуд гармонических составляющих

фильтра по напряжению от номера гармонической составляющей. Второе условие имеет достаточно тривиальное решение, причём вид коэффициента передачи будет зависеть не только от типа применяемого фильтра и от тех упрощений, которые будут допущены разработчиком, но и от конкретных условий технического задания на разрабатываемое устройство. А вот первое условие требует более детального изучения алгоритма работы самого инвертора и его структуры.

Рассмотрим на конкретном примере предлагаемый способ расчёта выходного фильтра инвертора на заданный коэффициент гармоник синусоидального напряжения на нагрузке. Пусть имеется мостовой инвертор (см. рис. 1), реализующий равномерную многократную однополярную ШИМ с частотой квантования $f_k = 1,2$ кГц для построения синусоидального выходного напряжения с частотой $f = 50$ Гц, и требуется рассчитать параметры выходного Г-образного LC-фильтра, обеспечивающего на активной нагрузке $R = 10$ Ом коэффициент гармоник не более $K_r = 3\%$. Тип фильтра выбран исходя из его оптимальных массогабаритных показателей и большей эффективности по сравнению с обычными L- или C-фильтрами. Хотелось бы отметить, что в каждом конкретном случае выбор типа фильтра определяется только параметрами технического задания на проектируемое устройство.

Для расчёта необходимо, как мы уже отметили выше, получить форму

выходного напряжения инвертора. Примем для простоты все элементы в схеме идеальными, а процессы, протекающие в инверторе, будем рассматривать на периоде выходного напряжения в установившемся режиме. Это допущение вполне оправдано, так как разработчики всегда пытаются минимизировать паразитные явления, которые оказывают негативное влияние на работу устройства. Все математические расчёты, построение графиков и диаграмм работы будем реализовывать на персональном компьютере с использованием пакета математических вычислений Mathcad [1]. Управляющие импульсы по синусоидальной функции построения получаем, как показано на рисунке 2, путём сравнения управляющего выпрямленного синусоидального сигнала с пилообразным развёртывающим напряжением. В результате получим ШИМ-последовательность по синусоидальной функции построения, которую перераспределяем между ключами инвертора в соответствии с рисунком 3. Лог. 1 соответствует замкнутому состоянию ключа, а лог. 0 – разомкнутому. В соответствии с полученным алгоритмом управления, полагая постоянное напряжение на входе равным 10 В, строим диаграмму напряжения на выходе (см. рис. 4). Как видим, из постоянного напряжения на входе инвертора с помощью ШИМ мы получили на выходе двуполярное напряжение, модулированное по синусоидальной функции построения.

Раскладываем полученную функцию с помощью ПБПФ и определяем спектр амплитуд гармонических составляющих (см. рис. 5). Замечаем, что спектр состоит из первой гармонической составляющей (50 Гц) и массивов более высокочастотных гармоник, сконцентрированных возле частот, кратных частоте квантования (1,2; 2,4 кГц и т.д.). То есть данный спектр не содержит относительно низкочастотных гармонических составляющих (кроме первой), а высокочастотные можно легко отфильтровать обычным LC-фильтром. Причём чем выше будет частота квантования, тем в более высоком частотном диапазоне окажутся массивы высокочастотных гармонических составляющих. Определим также действующее значение выходного напряжения (7,955 В), действующее значение первой гармонической составляющей (7,071 В) и рассчитаем коэффициент гармоник, который составит 51,525%.

Теперь найдём функцию коэффициента передачи выходного фильтра от номера гармонической составляющей. Для этого по эквивалентной схеме выходного фильтра (см. рис. 6) составляем систему уравнений с использованием законов Кирхгофа и,

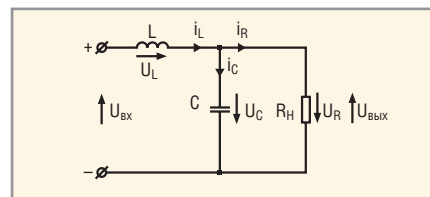


Рис. 6. Выходной фильтр

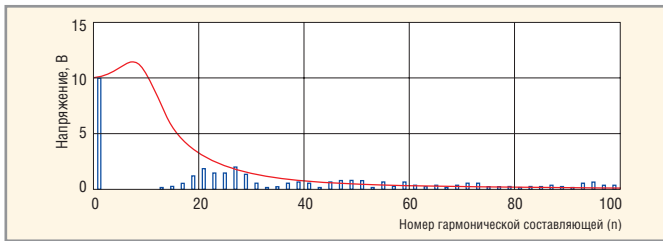


Рис. 7. Функция коэффициента передачи фильтра

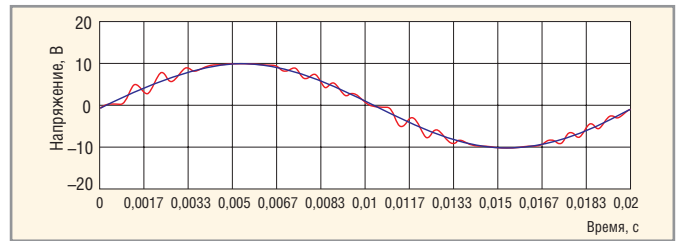


Рис. 8. Напряжение на нагрузке ($L = 3$ мГн, $C = 0,3$ мкФ)

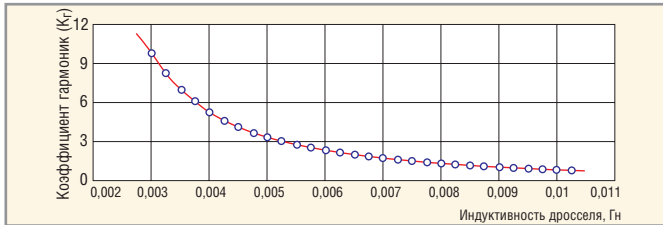


Рис. 9. Зависимость коэффициента гармоник от индуктивности дросселя

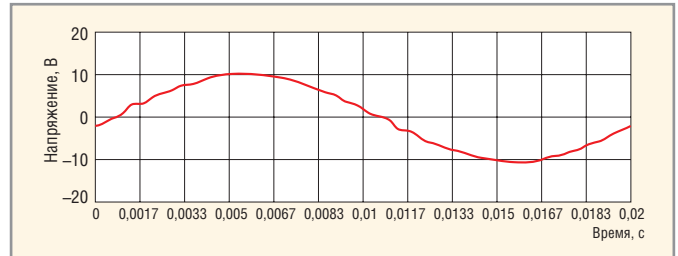


Рис. 10. Напряжение на нагрузке ($L = 6$ мГн, $C = 0,6$ мкФ)

производя простейшие математические преобразования, находим искомую функцию (1):

$$K_{фи} = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \frac{-R}{n^2 \omega^2 LCR - in\omega L - R}, \quad (1)$$

где n – номер гармонической составляющей; i – мнимая единица; $\omega = 2\pi f$ – круговая частота выходного напряжения; L – индуктивность дросселя фильтра; C – ёмкость конденсатора фильтра; R – сопротивление нагрузки.

Для дальнейших вычислений необходимо задаться начальными параметрами фильтра. Индуктивность дросселя принимаем равной $L = 3$ мГн, а ёмкость конденсатора находим из условия равенства волнового сопротивления фильтра сопротивлению нагрузки (2) для исключения резонансных явлений на одной из высокочастотных гармонических составляющих:

$$C = \frac{L}{R^2} = \frac{6 \times 10^{-3}}{10^2} = 0,3 \text{ [мкФ]}. \quad (2)$$

Перемножаем каждую гармоническую составляющую выходного на-

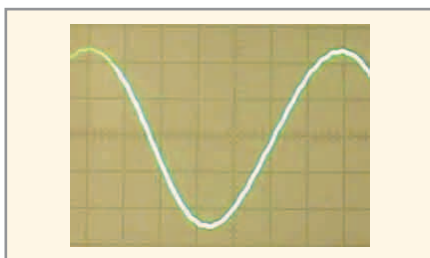


Рис. 11. Осциллограмма напряжения на нагрузке

пряжения инвертора на коэффициент передачи фильтра (см. рис. 7). Применяя ОБПФ, находим диаграмму напряжения на нагрузке (см. рис. 8). Видим, что напряжение на нагрузке имеет синусоидальный характер с некоторыми искажениями из-за наличия высокочастотных гармонических составляющих, не полностью подавленных фильтром, и фазовый сдвиг по первой гармонике, равный $5,549^\circ$. Коэффициент гармоник напряжения на нагрузке составляет $9,739\%$. Таким образом, становится очевидно, что фильтр с указанными параметрами недостаточен для обеспечения на выходе заданного коэффициента гармоник напряжения.

По приведённому алгоритму рассчитаем коэффициент гармоник напряжения на нагрузке при различных параметрах фильтра с учётом выражений (1) и (2) от начального значения индуктивности дросселя, равной $L = 3$ мГн с шагом $\Delta L = 0,25$ мГн для тридцати значений. Получаем зависимость коэффициента гармоник выходного напряжения от индуктивности дросселя фильтра, график которой изображён на рисунке 9. Производя расчёты при разных частотах квантования или выходных частотах инвертора, можно получить семейства подобных характеристик.

Теперь, исходя из зависимости, представленной на рисунке 9, принимаем индуктивность дросселя фильтра равной 6 мГн и, пользуясь выражением (2), находим ёмкость конденсатора – $0,6$ мкФ. Затем находим диаграмму напряжения на нагрузке (см. рис. 10). Видим, что напряжение

на нагрузке имеет синусоидальный характер с некоторыми незначительными искажениями, причём фазовый сдвиг, обусловленный влиянием фильтра, увеличился до $11,176^\circ$. Коэффициент гармоник напряжения на нагрузке составляет всего $2,283\%$, что вполне удовлетворяет заданному в условии значению. Таким образом, необходимые основные параметры фильтра при заданной выходной частоте и частоте квантования найдены.

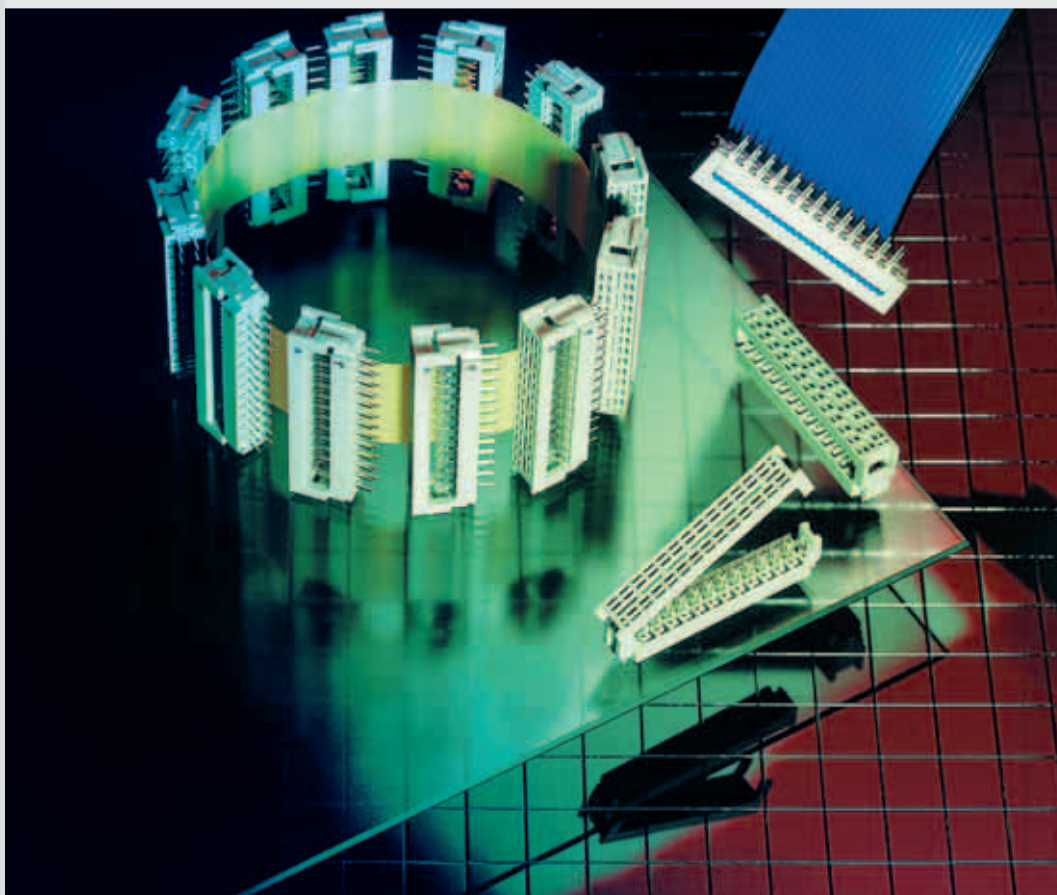
Описанная методика расчёта фильтров применялась при разработке универсального лабораторного макета одно-/трёхфазного инвертора ШИМ (УМИШИМ-3/1) [2] и показала свою эффективность. На рисунке 11 приведена осциллограмма напряжения на нагрузке при работе инвертора в режиме многократной равномерной двуполярной трёхфазной ШИМ. При этом затраты времени на расчёт были минимальными, а сам расчёт проводился на персональном компьютере, имеющем невысокую вычислительную мощность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mathcad 6.0 PLUS. Финансовые, инженерные и научные расчёты в среде Windows 95. Изд. 2-е. М.: Филинь, 1997.
2. Семёнов В.Д., Матвеев К.Ф., Захаров А.А. Универсальный макет одно-/трёхфазного инвертора для проведения лабораторных работ по курсу «Преобразовательная техника». Материалы Всероссийской научно-методической конф. «Совершенствование систем управления качеством подготовки специалистов». 20 – 21 марта 2003 г., Красноярск. Часть II. С. 23–24.



Соединители и электротехнические компоненты



B BULGIN

CONEC

Switchcraft

Grayhill

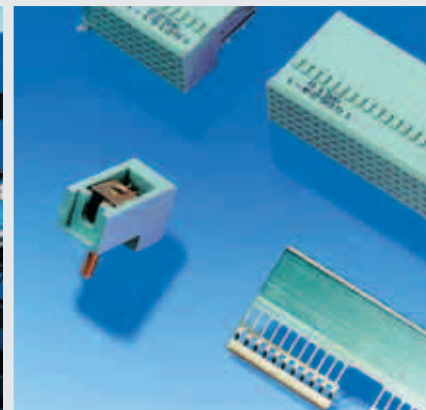
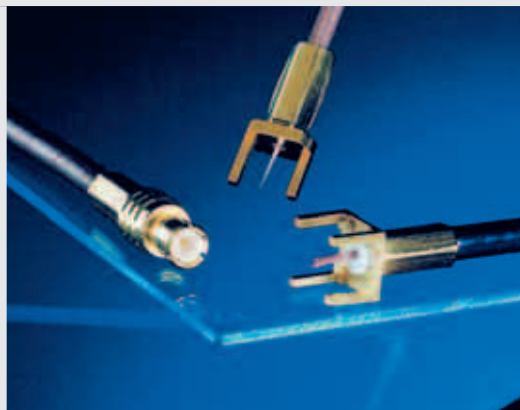
OMRON

tyco **AMP**
Electronics



Безупречный контакт в любых условиях!

- Весь ассортимент разъёмов и компонентов коммутации от мировых производителей
- Электромеханические и твердотельные реле от компании Omron
- Технические консультации
- Комплексные поставки
- Создание склада для постоянных клиентов



PROSOFT[®]

ПРОСОФТ — АКТИВНЫЙ КОМПОНЕНТ ВАШЕГО БИЗНЕСА

Телефон: (095) 234-0636 • E-mail: info@prochip.ru • Web: www.prochip.ru