

Расчет выходного фильтра ШИМ-инвертора

на заданный коэффициент гармоник напряжения на нагрузке

В статье описана методика расчета параметров выходного фильтра на заданный коэффициент гармоник напряжения на нагрузке. Приведен пример расчета 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.

Александр Захаров

Seishel@mail.ru

В наше время бурного роста силовой преобразовательной техники трудно себе представить линейный блок питания у современного бытового прибора. Например, в отличие от предшественника, имеющего вторичный источник питания (ВИП) весом несколько килограммов, современный телевизор получает питание от импульсного многоканального источника с несравнимо меньшими массой и габаритами, обладающего большими функциями и возможностями. Причем частоты преобразования энергии стали намного выше стандартных пятидесяти герц обычной сети и с развитием элементной базы постоянно повышаются. Конечно, нельзя утверждать, что импульсная силовая электроника полностью вытеснила линейную (например, высококачественные усилители звуковой частоты комплектуются только линейными источниками питания, так как импульсные ВИПы являются источниками недопустимых для устройств данного класса помех), но то, что в настоящее время она заняла доминирующее положение, — несомненно. Причем это характерно для большого класса устройств, преобразующих электрическую энергию: преобразователей тока и напряжения, преобразователей частоты, приводов электрических машин.

Вот и современные DC/AC-преобразователи, в терминологии преобразовательной техники — инверторы, строятся с применением высокочастотных импульсных схем, что позволяет более точно воспроизводить требуемый вид напряжения на выходе, с возможностью регулирования уровня и частоты, а также формы сигнала при помощи только системы управления. Данные принципы построения DC/AC-преобразователей применяют практически везде, где требуется преобразовать энергию постоянного тока в энергию переменного тока, например для питания обычных бытовых приборов от хими-

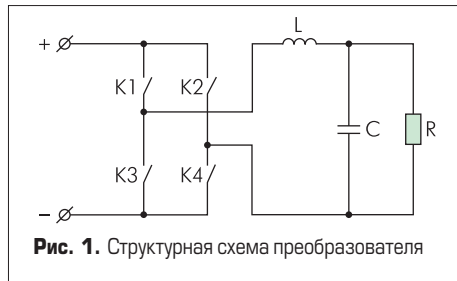
ческих источников питания постоянного тока на автономных транспортных средствах, или как часть источников бесперебойного питания для обслуживания особо критичных компьютерных, телерадиокоммуникационных систем, медицинской техники, или для создания приводов управления электрическими двигателями. Да и мало ли еще какие задачи ставит жизнь перед разработчиками преобразовательной техники, где необходимо использование устройств подобного класса.

Инверторы в своей массе строятся на основе самых разнообразных схемных решений в зависимости от конкретного назначения. Нас же, исходя из темы разговора, интересуют в основном автономные инверторы напряжения с какой-то формой выходного сигнала, в частном случае, как наиболее часто востребованной, синусоидальной формой. Обычно форма сигнала формируется по средствам ШИМ, то есть при помощи изменения ширины импульса на отрезках квантования, на которые разбивается весь период сигнала, что в конечном итоге изменяет амплитуду выходного напряжения в пределах данного интервала после фильтрации. Но из-за дискретности преобразования сигнал получается не идеально сглаженным, в нем присутствуют высокочастотные гармонические составляющие, да и диапазон регулирования уровня сигнала на выходе увеличивает коэффициент гармоник. Вот здесь и встает вопрос о фильтрации этих высокочастотных гармонических составляющих на выходе инверторов для того, чтобы они никак не сказывались на работе потребителя. Зачем, спросите вы, такие тонкости, как расчет выходного фильтра на заданный коэффициент гармоник инвертора привода для питания, например, асинхронного двигателя? И наверное, будете правы, так как сам двигатель является отличным индуктивным фильтром. Но несомненно, существуют приме-

нения, где выходное синусоидальное напряжение просто необходимо, — не какое-нибудь, больше похожее на меандр с кучей высокочастотных гармонических составляющих, которые вызывают дополнительные потери мощности, помехи и риск возникновения резонансных процессов, а именно синусоидальное. Например, источники бесперебойного питания серьезных и уже давно зарекомендовавших себя фирм-производителей для критичных применений на выходе имеют именно синусоидальное напряжение. Да и множество приборов и устройств рассчитано именно на синусоидальное питающее напряжение, допуская некоторые отклонения по нелинейности. Поэтому-то вопрос расчета фильтра на заданный коэффициент гармоник столь важен в современной преобразовательной технике, так как является необходимым условием нормального функционирования приборов и устройств потребителей, задавая ограничение по нелинейности выходного синусоидального сигнала.

В настоящее время в технической литературе достаточно широко и полно описываются алгоритмы расчета выходных фильтров выпрямителей на заданный коэффициент пульсаций напряжения на нагрузке, с приведением необходимых формул и соотношений к ним. А вот с методикой расчета выходных фильтров инверторов на заданный коэффициент гармоник напряжения на нагрузке познакомиться довольно сложно, если не сказать, что практически невозможно. И в основном разработчики электронной техники, сталкиваясь с такой проблемой, решают ее опытным путем. Хотя экспериментальные данные наиболее правдиво отражают сложившуюся ситуацию, но все согласятся с автором в том, что постановка и проведение эксперимента — трудоемкий и кропотливый процесс, требующий, кроме того, и дополнительных финансовых затрат. Как этого избежать? Можно попытаться решить эту проблему аналитически, но это тоже довольно трудоемкая задача, требующая много времени, и никто не поручится за то, что вы сможете получить положительный результат. Что же делать? Я предлагаю воспользоваться вторым путем — решить эту проблему аналитически с некоторыми упрощениями и допущениями, перекладывая все сложные математические расчеты на «плечи» компьютера, а первый способ применить как проверку выдвинутого метода.

Суть предложенного метода заключается в раскладывании формы напряжения на вы-



ходе инвертора с помощью прямого быстрого преобразования Фурье (ПБПФ) в спектр амплитуд гармонических составляющих, «пропускания» через фильтр каждой гармонической составляющей в отдельности и последующего восстановления сигнала на выходе фильтра по средствам обратного быстрого преобразования Фурье (ОБПФ). Что же мы получаем? Мы получаем простую идею, основанную только на БПФ, результат применения которой хоть и не будет сверхточным применительно к реальным устройствам, причем точность будет в большей степени зависеть от примененных упрощений и допущений, нежели от точности вычислительного процесса, но тем не менее сможет дать представление об основных параметрах фильтра. Причем можно получить не только вид 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 все же, каким бы простым ни казалось решение поставленной задачи, данный метод имеет свои нюансы применения. Для его реализации необходимо хотя бы представлять форму выходного напряжения инвертора и получить коэффициент передачи фильтра по напряжению от номера гармонической составляющей. Второе условие, как мне кажется, имеет довольно тривиальное решение, причем вид коэффициента передачи будет разным в каждом конкретном случае и будет зависеть не только от типа применяемого фильтра, 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 непосредственно алгоритма работы самого инвертора и его структуры.

Рассмотрим подробнее на конкретном примере предлагаемый способ расчета выходного фильтра инвертора на заданный коэффи-

циент гармоник синусоидального напряжения на нагрузке. Пусть имеется мостовой инвертор (рис. 1), реализующий равномерную многократную однополярную ШИМ по синусоидальной функции построения с частотой выходного сигнала $f = 50$ Гц, частотой квантования $f_k = 1,2$ кГц, и пусть требуется рассчитать параметры выходного Г-образного LC-фильтра, обеспечивающего на активной нагрузке $R = 10$ Ом коэффициент гармоник синусоидального напряжения не более $K_T = 3\%$. Данный тип фильтра мы выбрали исходя из его оптимальных массо-габаритных 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 и фантазией разработчика. Данный метод лишь помогает рассчитать основные параметры фильтра на основе той передаточной функции, которую разработчик выведет, основываясь на своих предпочтениях и умозаключениях по его типу и синтезированной структуре.

Для расчета необходимо, как мы уже отметили выше, получить форму выходного напряжения инвертора. Поэтому сначала рассмотрим именно эту проблему. Примем для простоты все элементы в схеме идеальными, а все процессы, протекающие в инверторе, будем рассматривать на периоде выходного напряжения в установившемся режиме. Это допущение вполне оправданно, так как разработчики всегда пытаются минимизировать паразитные явления, которые оказывают негативное влияние на работу устройства. Все математические расчеты, 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 рис. 2, путем сравнения управляющего выпрямленного синусоидального сигнала с пилообразным развертывающим напряжением. Имеем в результате широтномодулированную импульсную последовательность по синусоидальной функции построения, которую перераспределяем между ключами инвертора в соответствии с рис. 3, причем логическая единица соответствует замкнутому состоянию ключа, а логический ноль — разомкнутому.

В соответствии с полученным алгоритмом управления, принимая уровень постоянного напряжения на входе равным 10 В, строим диа-

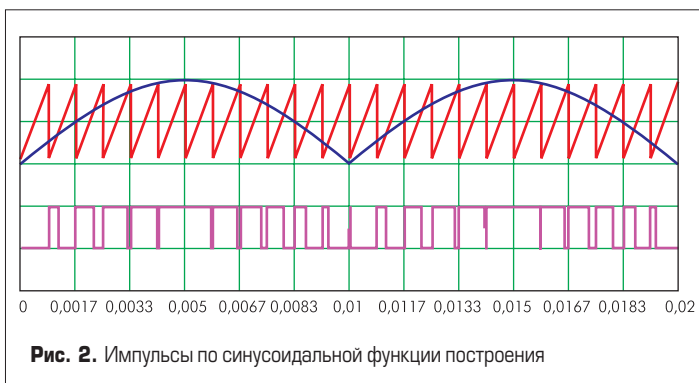




Рис. 4. Форма выходного напряжения инвертора

грамму напряжения на выходе (рис. 4). Как видим, из постоянного напряжения на входе инвертора с помощью ШИМ получили двухполярное модулированное по синусоидальной функции построения напряжение на выходе инвертора. Раскладываем полученную функцию с помощью БПФ и определяем ее спектр амплитуд гармонических составляющих (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 кГц, 2,4 кГц и т. д.). То есть данный спектр не содержит относительно низкочастотных гармонических составляющих (кроме первой), а только высокочастотные, и, следовательно, обычным LC-фильтром можно легко их отфильтровать, оставив только первую гармонику. Причем чем больше будет частота квантования, тем в более высоком частотном диапазоне окажутся массивы высокочастотных гармонических составляющих. Определим так же действующее значение выходного напряжения 7,955 В, действующее значение первой гармонической

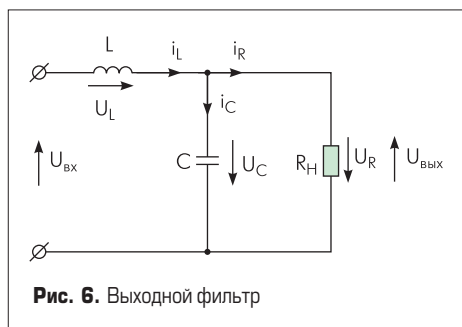


Рис. 6. Выходной фильтр

составляющей 7,071 В и рассчитаем коэффициент гармоник, который составит 51,525%.

Теперь найдем функцию коэффициента передачи выходного фильтра от номера гармонической составляющей. Для этого составляем по эквивалентной схеме выходного фильтра (рис. 6) систему уравнений с использованием законов Кирхгофа и, производя простейшие математические преобразования, находим искомую функцию (1).

$$K_{\text{фи}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{-R}{n^2 \times \omega^2 L \times C \times R - i \times n \times \omega \times L - R} \quad (1)$$

где n — номер гармонической составляющей;
 i — мнимая единица;
 $\omega = 2 \times \pi \times f$ — круговая частота выходного напряжения;

L — индуктивность дросселя фильтра;
 C — емкость конденсатора фильтра;
 R — сопротивление нагрузки.

Для дальнейших вычислений нам необходимо задаться начальными параметрами фильтра. Индуктивность дросселя принимаем равной $L = 3$ мГн, а емкость 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 напряжения инвер-

тора на коэффициент передачи фильтра (рис. 7). Применяя БПФ, находим диаграмму напряжения на нагрузке, изображенную на рис. 8 на фоне идеального синусоидального напряжения, имеющего такие же амплитуду и фазовый сдвиг. Видим, что напряжение на нагрузке имеет синусоидальный характер с некоторыми искажениями из-за наличия высокочастотных гармонических составляющих, не полностью подавленных фильтром и фазовым сдвигом по первой гармонике, величиной 5,549 электрических градусов. Коэффициент гармоник напряжения на нагрузке составляет 9,739%. То есть фильтр с данными параметрами недостаточен для обеспечения на выходе коэффициента гармоник напряжения, требуемого в условии, при заданной выходной частоте и частоте квантования.

Поэтому рассчитываем по данному алгоритму коэффициент гармоник напряжения на нагрузке при различных параметрах фильтра с учетом выражений (1) и (2) от начального значения индуктивности дросселя, равного $L = 3$ мГн, с шагом $\Delta L = 0,25$ мГн для тридцати значений. Получаем зависимость коэффициента гармоник выходного напряжения от индуктивности дросселя фильтра, график которой изображен на рис. 9. Производя расчеты при разных частотах квантования или выходных частотах инвертора, можно получить семейства подобных характеристик.

Теперь, исходя из зависимости, представленной на рис. 9, принимаем индуктивность дросселя фильтра равной $L = 6$ мГн, емкость конденсатора фильтра находим, с учетом выраже-

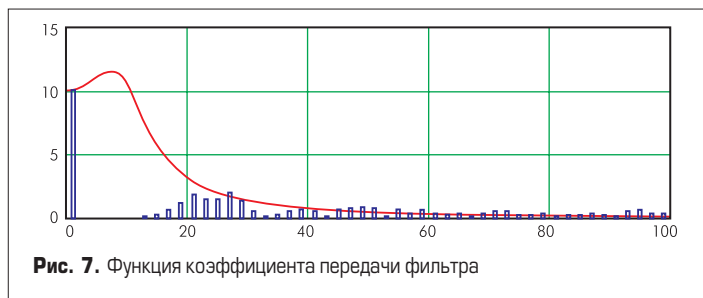


Рис. 7. Функция коэффициента передачи фильтра



Рис. 8. Напряжение на нагрузке

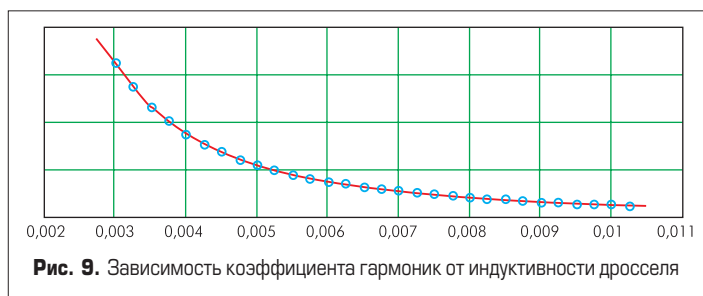


Рис. 9. Зависимость коэффициента гармоник от индуктивности дросселя



Рис. 10. Напряжение на нагрузке

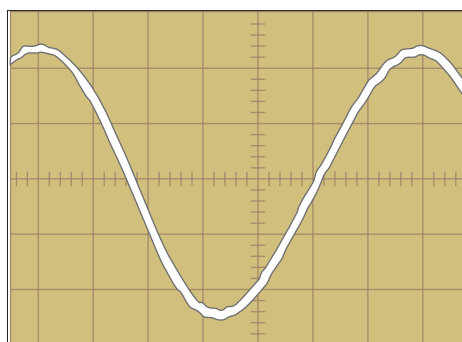


Рис. 11. Осциллограмма напряжения на нагрузке

ния 2, равной $C = 0,6$ мкФ и, основываясь на приведенной выше методике, находим диаграмму напряжения на нагрузке (рис. 10). Видим, что напряжение на нагрузке имеет синусоидальный характер с некоторыми незначительными искажениями, причем фазовый сдвиг, обусловленный влиянием фильтра, увеличился до 11,176 электрических градусов. Коэффициент гармоник напряжения на нагрузке составляет всего 2,283%, что вполне удовлетворяет требуемому в условии значению. То есть мы нашли необходимые основные параметры фильтра при заданных выходной частоте и частоте квантования.

Данная методика расчета фильтров применялась при разработке универсального лабораторного макета одно/трехфазного инвертора ШИМ (УМИШИМ-3/1) [2] и показала свою эффективность. На рис. 11 приведена осциллограмма напряжения на нагрузке при работе инвертора в режиме многократной равномерной двухполярной трехфазной ШИМ. Причем затраты времени на расчет были минимальны и составили порядка нескольких десятков минут, а сам расчет проводился на персональном компьютере, имеющем невысокую вычислительную мощность.

Литература

1. Mathcad 6.0 PLUS. Финансовые, инженерные и научные расчеты в среде Windows 95. Издание 2-е, стереотипное. М.: Информационно-издательский дом «Филинь». 1997.
2. Семенов В. Д., Матвеев К. Ф., Захаров А. А. Универсальный макет одно/трехфазного инвертора для проведения лабораторных работ по курсу «Преобразовательная техника». Материалы Всероссийской научно-методической конференции «Совершенствование систем управления качеством подготовки специалистов». 20–21 марта 2003 года, Красноярск, Россия. В двух частях. Часть вторая.