

УДК 621.314.632

С.Н. БОЙКО, С.Я. ВИШНЕВСКИЙ

Кременчуцкий национальный университет имени М. Остроградского

Д.А. МИХАЙЛИЧЕНКО

Винницкий национальный технический университет

МОДЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ГАРМОНИЧЕСКОГО СОСТАВА ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОДНОФАЗНОГО ИНВЕРТОРА ПРИ РАЗНЫХ ЗАКОНАХ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИИ

При проектировании электротехнических и электромеханических комплексов с использованием преобразователей частоты необходимо учитывать степень влияния последних на показатели электромагнитной совместимости потребителя электрической энергии в целом.

Сделать аргументированный выбор структуры и алгоритма управления инвертором позволит оценка гармонического состава выходных параметров инвертора при различных законах широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

В статье приведены результаты моделирования форм кривых тока и напряжения IGBT-инвертора в функции ряда различных алгоритмов управления при ШИМ. Исследованы наиболее реализуемые варианты модуляции: с прямоугольной и трапецидальной формами кривых тока (напряжения). Оценены варианты и показаны преимущества трапецидального закона в отличие от других.

Ключевые слова: инвертор напряжения, гармонический состав тока и напряжения.

S.M. BOYKO, S.Y. VYSHNEVSKY

Kremenchuk National University named after Michael Ostrogradskiy

D.A. MYHAJLYCHENKO

Vinnytsia National Technical University

MODEL ANALYSIS OF HARMONIC OUTPUT PARAMETERS SINGLE-PHASE INVERTER IN DIFFERENT LAWS PULSE WIDTH MODULATION

In the design of electrical and electromechanical systems with the use of frequency converters is necessary to take into account the degree of influence of the latter on the electromagnetic compatibility of electric energy consumers in general.

Make a reasoned choice of the structure and the inverter control algorithm will allow the evaluation of the harmonic content of the output of the inverter parameters for different types of pulse-width modulation (PWM).

The results of the simulation waveforms of current and voltage IGBT-inverter in a number of different functions under the PWM control algorithm. We studied the most realizable modulation options: rectangular and trapezoidal shape of the curve of current (voltage). Evaluate options and the advantages of the keystone of the law as opposed to the other.

Keywords: voltage inverter, the harmonic structure of current and voltage.

Введение

При эксплуатации электротехнических и электромеханических комплексов с использованием преобразователей частоты последние, в силу естественного искажения форм кривых тока и напряжения, как правило, отрицательно влияют на энергетические показатели как самого привода так и системы электропитания в целом [1, 2].

Основными способами улучшения электромагнитной совместимости таких устройств является применение различных фильтров и законов управления силовыми модулями, входящими в состав преобразовательных устройств.

Актуальность направления исследований

Одной из обязательных задач, подлежащих решению для успешной реализации в практику создания электромеханических комплексов вида преобразователей частоты – асинхронных двигателей (ПЧ-АД) является правильный выбор алгоритма формирования выходных параметров – тока, напряжения преобразователя (инвертора) [1].

Поэтому разработка структуры – такого алгоритма формирования формы кривой тока при широтно-импульсной модуляции (ШИМ) IGBT-инвертора для конкретной электротехнической системы с известными параметрами является вопросом актуальным [2].

Эта актуальность еще более значима для тяговых электромеханических комплексов (ТЭМК) в силу специфики требований к ним и условий эксплуатации [3]. В частности, с целью повышения эффективности функционирования ТЭМК [3] конструктора, как правило, повышают частоту коммутации IGBT транзисторов. Этот факт, как ровно и другие, требуют дополнительных исследований.

Цель работы. Исследование коэффициента гармоник выходных форм тока и напряжения однофазного IGBT-инвертора при прямоугольной, трапецидальной и синусоидальной ШИМ с выходной частотой 100 Гц.

Материалы и результаты исследования

Для исследования гармонического состава тока и напряжения IGBT-инвертора авторами использовалась модель, построенная в программном пакете Матлаб и имеющая вид [4] (рис. 1):

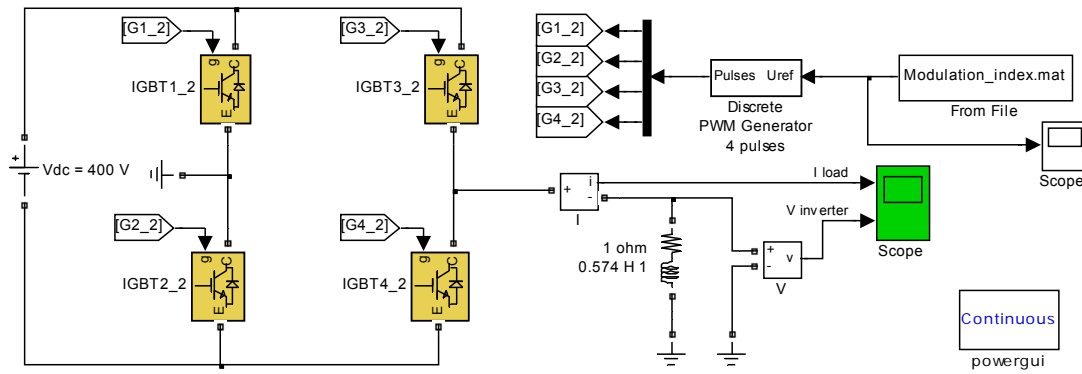


Рис. 1. Схема модели для исследования работы в однофазном реверсивном инверторе

Здесь IGBT1_2... IGBT4_2 – одиночные IGB-транзисторы, включенные по реверсивной схеме с питанием от источника постоянного напряжения 400 В. Discrete PWM Generator 4 pulses осуществляет формирование управляющих импульсов на IGB-транзисторах в соответствии с управляющим входным модулирующим сигналом, снимаемым с блока Modulation_index.mat. В этом блоке извне по отношению к рассматриваемой модели Матлаб формируется та или иная зависимость коэффициента модуляции от времени. Последовательно соединенные активное и индуктивное сопротивления формируют собой нагрузку с заданным $\cos\varphi=0.866$. Измерительные преобразователи I и V обеспечивают визуализацию процессов тока и напряжения на осциллографе Scope.

Рассмотрим три возможных и наиболее реализуемых варианта модуляции ШИП: 1) с прямоугольной формой напряжения частотой 100 Гц; 2) с трапецидальной формой напряжения с коэффициентом модуляции равным 0.95, что обеспечивает на выходе ШИМ-напряжение с максимальной амплитудой на выходе; 3) с трапецидальной формой напряжения с коэффициентом модуляции равным 0.5, что обеспечивает на выходе ШИМ-напряжение с половинной амплитудой на выходе. Частота модуляции в двух последних вариантах составляет 2.4 кГц. Во всех случаях в трапецидальном напряжении время нарастания, спада и постоянной величины равны между собой, как это показано на рисунке 2:

Нагрузка инвертора активно-индуктивная, с углом нагрузки $\cos\varphi \approx 0,866$. При величинах активного и индуктивного сопротивлений нагрузки $R = 1$ Ом и $L = 0.574$ Гн мы получим требуемое значение:

$$\cos\varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + L^2}} = \frac{1}{\sqrt{1^2 + 0.574^2}} \approx 0.866$$

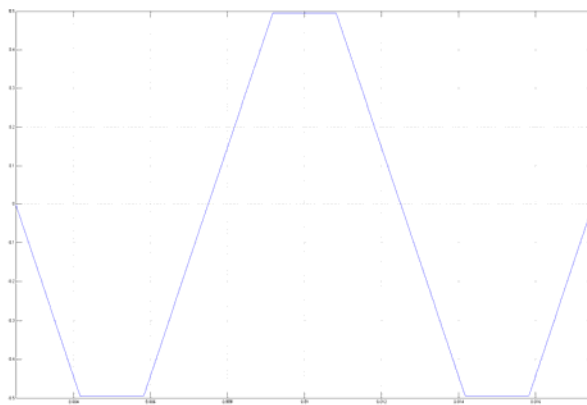


Рис. 2. График трапецидального сигнала управления инвертором

Исследование показателей работы инвертора при прямоугольном выходном напряжении. При моделировании этого варианта с помощью модели рисунок 1 были получены следующие графики выходных тока и напряжения инвертора:

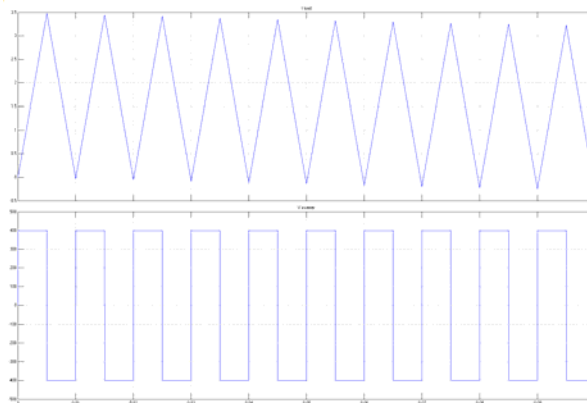


Рис. 3. Графики выходных тока и напряжения инвертора при «прямоугольной» коммутации транзисторов

Для того чтобы оценить гармонический состав тока и напряжения на выходе инвертора, используется графический интерфейс пользователя powergui. Если кликнуть два раза по блоку powergui, то откроется окно инструментария с вертикально расположенным рядом кнопок, среди которых выберем интересующую нас кнопку FFT Analysis (FFT – Fast Fourier Transformation – Быстрое Преобразование Фурье). Нажав на указанную кнопку, получим окно, изображённое на рисунке 4.

В этом окне сверху располагается график, который надо проанализировать на гармонический состав, снизу – результат анализа быстрого преобразования Фурье – график с гармониками, на котором по оси абсцисс отложена частота, по оси ординат – амплитуда гармоники.

Для получения результатов FFT следует произвести предварительную настройку. Так, в FFT windows указывается начальное время (0 с) и число полных периодов (в нашем случае мы приняли 10) а также частота исследуемого сигнала (в нашем случае было заведомо известно, что 100 Гц), в Available signals в среднем окне Input выбирается исследуемый сигнал (либо ток – I inverter, либо напряжение – V inverter). В FFT setting в Display style выбирается вид представления полученного быстрого преобразования Фурье: либо в виде графиков, либо в виде таблиц, либо в абсолютных, либо относительных единицах, в Frequency axes выбирается либо абсолютные значения полученных гармоник, либо их номер, в Max Frequency (Hz) указывается максимальная интересующая нас частота гармоники. При той конфигурации настройки, что показана на рисунке 3, мы получим в кривой напряжения следующие гармоники (таблица 1).

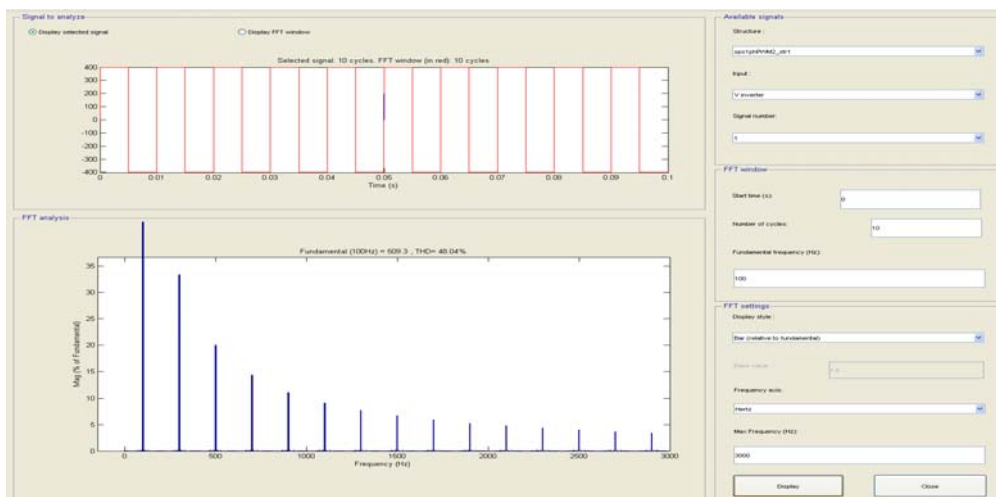


Рис. 4. Окно быстрого преобразования Фурье для графика напряжения при прямоугольной форме напряжения

Таблица 1

100 Гц	100 %	1500 Гц	6,66%
300 Гц	33,33 %	1700 Гц	5,87%
500 Гц	20%	1900 Гц	5,25%
700 Гц	14,28%	2100 Гц	4,75%
900 Гц	11,11%	2300 Гц	4,34%
1100 Гц	9,09%	2500 Гц	3,99%
1300 Гц	7,69%	2700 Гц	3,69%
		2900 Гц	3,43%

Здесь 1-я гармоника на частоте 100 Гц имеет амплитуду 509,3 В. Следует отметить также показатель THD – Total Harmonic Distortion – коэффициент гармоник. Здесь он составляет величину THD =

48,04 %.

Для графика выходного тока инвертора результат FFT будет выглядеть следующим образом (рис. 5):

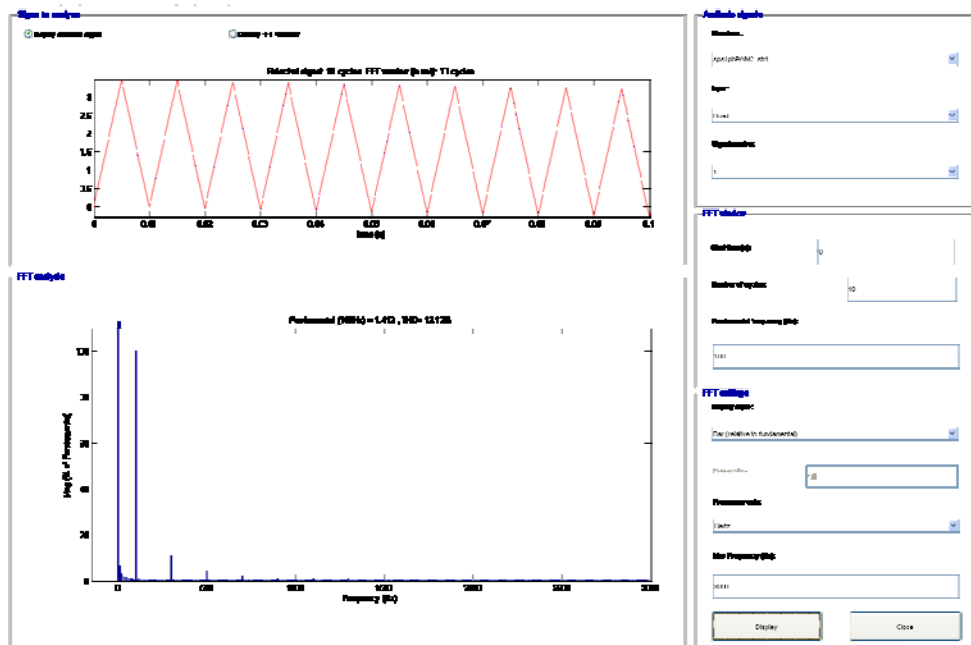


Рис. 5. Окно быстрого преобразования Фурье для графика тока при прямоугольной форме напряжения

Соответственно, в кривой тока будут иметься следующие гармоники (таблица 2):

Таблица 2

100 Гц	100 %	700 Гц	2,04%
300 Гц	11,11 %	900 Гц	1,23%
500 Гц	4%	1100 Гц	0,83%

Здесь 1-я гармоника на частоте 100 Гц имеет амплитуду 1.412 А. Прочие гармоники в кривой тока по амплитуде составляют меньше 1%. THD – коэффициент гармоник тока тут гораздо меньше – 12,12%, чем в кривой прямоугольного напряжения.

Исследование показателей работы инвертора при ШИМ с коэффициентом модуляции 0.95.

На модели рисунок 1 получим также результаты моделирования при коэффициенте модуляции 0.95, отраженные на рисунке 5.

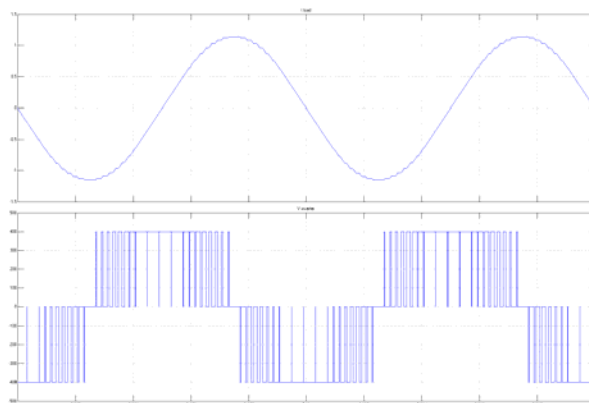


Рис. 6. Графики тока и напряжения при ШИМ с коэффициентом модуляции 0,95

На рисунке 7 приведены результаты быстрого преобразования Фурье для сигнала напряжения с коэффициентом модуляции 0.95.

Как следует из рисунка 6, 1-я гармоника на частоте 100 Гц имеет амплитуду 414.7 В, а также кривая напряжения имеет приведённые в таблице 3 гармоники.

Таблиця 3

100 Гц	100 %	1100 Гц	0,68%
300 Гц	0,25 %	1500 Гц	0,26%
500 Гц	3,71%	1900 Гц	0,26%;
700 Гц	1,97%	2100 Гц	0,50%;
900 Гц	0,37%	2300 Гц	0,71%.

Коэффициент гармоник THD тут составляет довольно значительную величину – 45.93%.
 На рисунке 8 приведены результаты преобразования Фурье для сигнала тока с коэффициентом модуляции 0.95.

Соответственно, в кривой тока будут иметься следующие гармоники:

Таблиця 4

100 Гц	100 %	700 Гц	0,28%
300 Гц	0,08%	900 Гц	0,37%
500 Гц	0,75%	1100 Гц	0,06%

1-я гармоника на частоте 100 Гц имеет амплитуду 1,149 А.
 Коэффициент гармоник для тока THD = 1,12%.

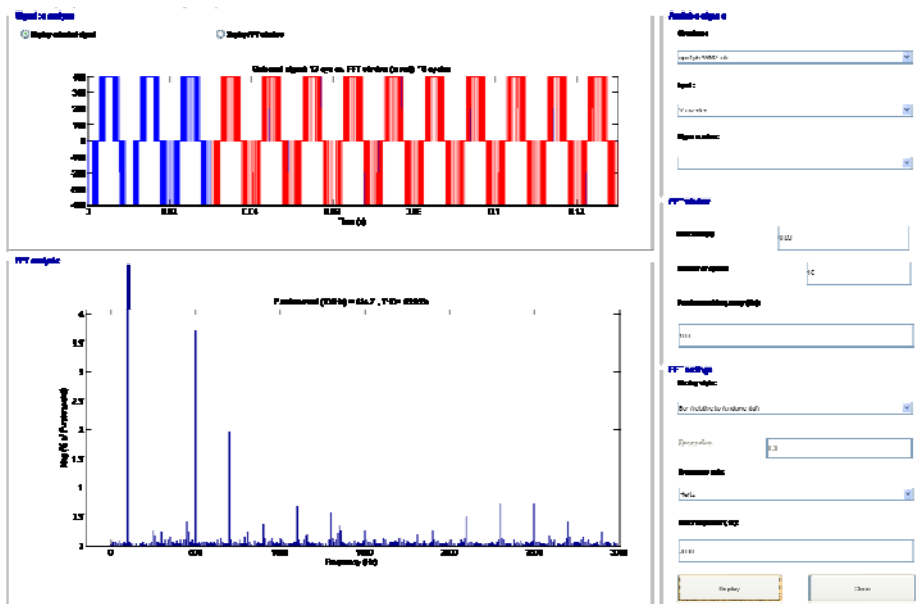


Рис. 7. Окно быстрого преобразования Фурье для графика напряжения ШИМ с коэффициентом модуляции 0,95

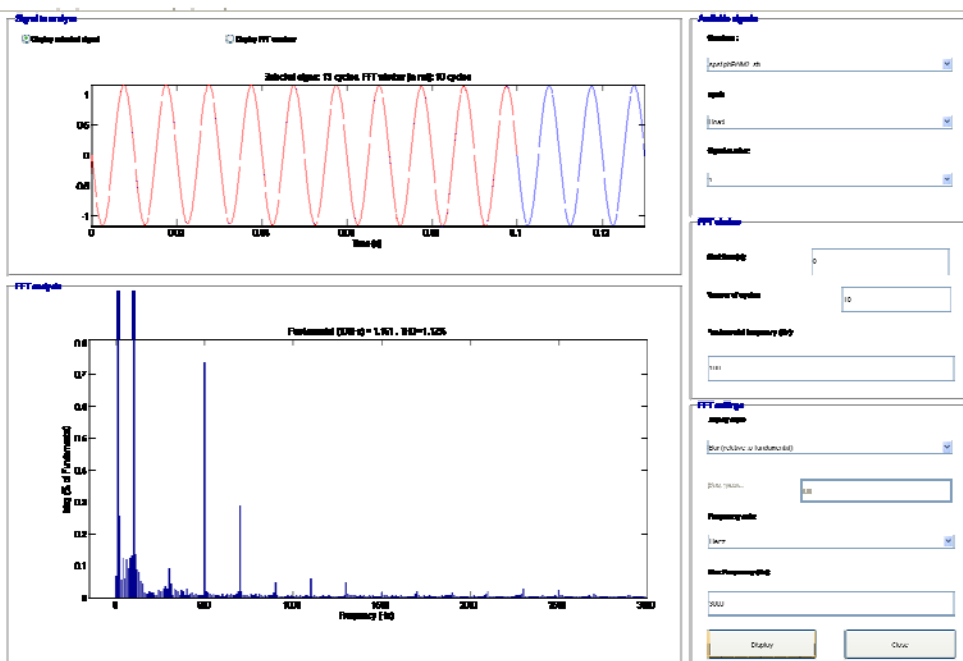


Рис. 8. Окно быстрого преобразования Фурье для графика тока при ШИМ с коэффициентом модуляции 0,95

Исследование показателей работы инвертора при ШИМ с коэффициентом модуляции 0.5.

На модели рисунок 1 получим также результаты моделирования при коэффициенте модуляции 0.5, отраженные на рисунке 9.

Коэффициент гармоник для графика напряжения при ШИМ с коэффициентом модуляции 0,5 THD = 118,11%.

Ниже (рисунок 10) приведены результаты быстрого преобразования Фурье для сигнала напряжения с коэффициентом модуляции 0.5.

Для этого графика состав гармоник будет следующим:

Таблица 5

100 Гц	100 %	1500 Гц	1,43%
500 Гц	3,94%	2100 Гц	1.22%;
700 Гц	1,76%	2170 Гц	1.16%.
1100 Гц	1.41%		

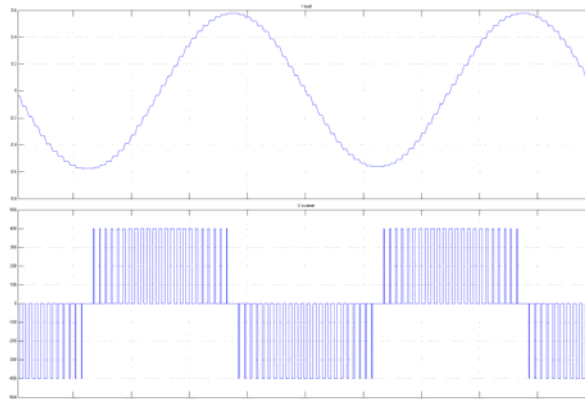


Рис. 9. Графики тока и напряжения при ШИМ с коэффициентом модуляции 0,95

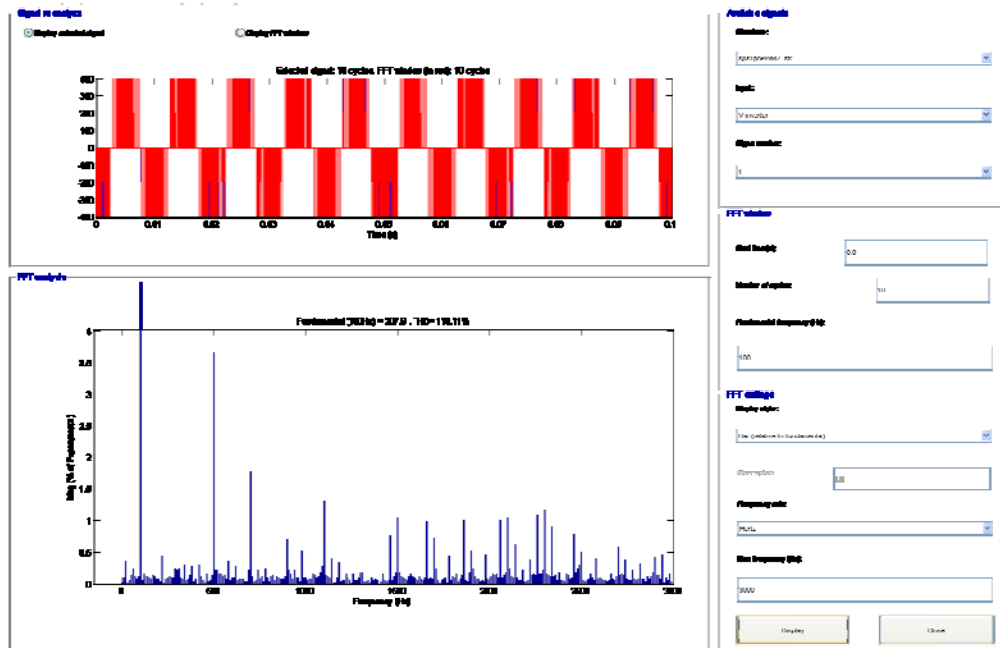


Рис. 10. Окно быстрого преобразования Фурье для графика напряжения при ШИМ с коэффициентом модуляции 0,5

Ниже приведены результаты быстрого преобразования Фурье для сигнала напряжения с коэффициентом модуляции 0.5.

Состав гармоник для графика тока показан в таблице 6.

Коэффициент гармоник для графика тока при ШИМ с коэффициентом модуляции 0,5 THD = 2,28%

Таблица 6

100 Гц	100 %	1100 Гц	0,12%
500 Гц	0,79%	1500 Гц	0,09%
700 Гц	0,25%	2100 Гц	0,06%

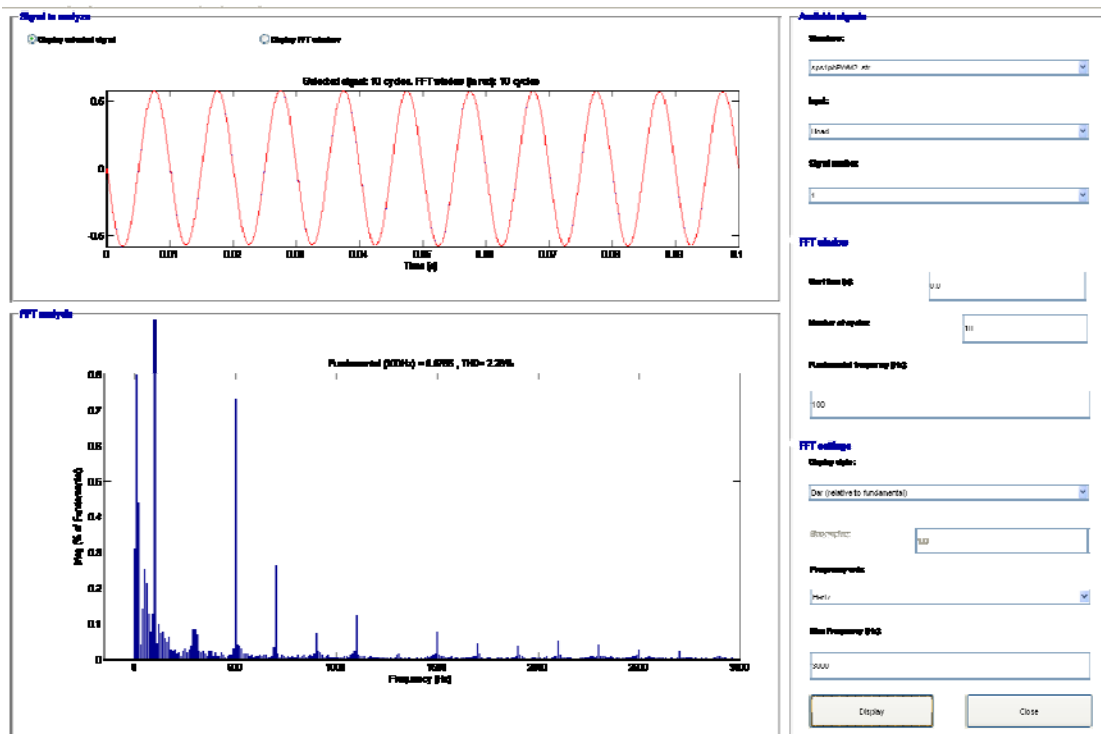


Рис. 11. Окно быстрого преобразования Фурье для графика тока при ШИМ с коэффициентом модуляции 0,5

Выводы

Если судить по коэффициенту гармоник для кривой напряжения, то работа инвертора с ШИМ с коэффициентом модуляции 0,5 является наихудшим режимом, так как THD = 118,11% более чем в 2 раза больше, чем THD = 48,04% для прямоугольного выходного напряжения и THD = 45,93% для выходного напряжения инвертора с коэффициентом модуляции 0,95. Однако, учитывая, что рассматривается работа инвертора напряжения на высокоинерционную нагрузку (например, на обмотку возбуждения синхронного двигателя), то большее значение имеют гармоники в кривой тока, так как в основном обмотки возбуждения промышленных двигателей выполняется на массивных роторах, что обуславливает повышенные потери от вихревых токов. Так, наилучшим по гармоническому составу графика тока является вариант ШИМ с коэффициентом модуляции 0,95 (THD = 1,12%) против варианта ШИМ с коэффициентом модуляции 0,5 (THD = 2,28%) и тем более варианта с прямоугольным выходным напряжением (THD = 12,12%). Если отбросить все гармоники с амплитудой менее 1% от амплитуды основной гармоники, то в кривых тока с коэффициентами модуляции 0,95 и 0,5 можно учитывать только основную гармонику с частотой 100 Гц, при том, что в кривой тока в прямоугольном варианте выходного напряжения инвертора имеются гармоники с частотами 100, 300, 500, 700, 900 Гц.

Как количественно влияют на потери от вихревых токов в массивных сердечниках гармоники амплитудой менее 1% от основной гармоники – неизвестно, но в первом приближении можно утверждать, что для питания обмоток возбуждения синхронных двигателей прямоугольное напряжение является гораздо более неблагоприятным вариантом, чем питание трапецидальным напряжением с любым коэффициентом модуляции.

Литература

1. Шидловский А.К. Транзисторные преобразователи с улучшенной электромагнитной совместимостью / А.К. Шидловский, А.В. Козлов, Н.С. Комаров, Г.А. Москаленко. – К. : «Наукова думка», 1993. – 272 с.
2. Полупроводниковые преобразователи электрической энергии в структурах электроприводов. Схемотехника и принципы управления : учебное пособие / [И.О. Синчук, А.А. Чернышев, И.И. Киба, О.В. Пасько, О.Е. Ключка, О.Е. Мельник] / под ред. Синчука О.Н. – Кременчуг : Вид. Щербатих О.В., 2008. – 88 с.
3. Комбинаторика преобразователей напряжения современных тяговых электроприводов рудничных электровозов : научное издание / О.Н. Синчук, И.О. Синчук, Н.Н. Юрченко, А.А. Чернышов, О.А. Удовенко, О.В. Пасько, Э.С. Гузов. – Киев : ІЕДНАНУ, 2006. – 252 с.
4. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты / Р.Т. Шрейнер. – Екатеринбург : УРО РАН, 2000. – 654 с.
5. Пусковые системы нерегулируемых электроприводов : монография / Черный А.П., Гладарь А.И., Осадчук Ю.Г., Курбанов И.Р., Вошун А.Н. – Кременчуг : ЧП Щербатих А.В., 2006. – 280 с.
6. Tihanyi L. EMC in Power Electronics / L. Tihanyi. – N.Y. : IEEE Press, 1995. – 402 с.

7. Електроніка і мікросхемотехніка : у 4 т. Том 4 : Силова електроніка : підручник / В.І. Сенько, М.В. Панасенко, Є.В. Сенько, М.М. Юрченко, Л.І. Сенько, В.В. Ясінський / за ред. В.І. Сенька. – К. : Каравела, 2013. – 956 с.
8. Терехов В.М. Системы управления электроприводов : учебник для вузов / В.М. Терехов, И.О. Осипов. – М. : Изд. центр «Академия», 2006. – 680 с.
9. Ключев В.И. Теория электропривода : учебник для вузов / Ключев В.И. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 560 с.
10. Вейнгер А.М. Регулируемый синхронный электропривод / Вейнгер А.М. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 224 с.
11. Синчук О.Н. Моделирование пуска неявнополюсного синхронного электрического двигателя / О.Н. Синчук, В.Ю. Захаров, Д.А. Михайличенко // Електротехнічні та комп'ютерні системи : науково-технічний журнал. – К. : Техніка, 2012. – Вип. 08(84). – С. 24–30.
12. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты / Р.Т. Шрейнер. – Екатеринбург : УРО РАН, 2000. – 654 с.

Рецензія/Peer review : 17.8.2016 р.

Надрукована/Printed : 26.8.2016 р.

Рецензент: д.т.н. Синчук О. М.