

УДК 621.314

Т. К. БАРАНЕНКО (канд.техн.наук, доц.), **В. Е. САРАВАС**
Приазовский государственный технический университет
 tatianabaranenko@mail.ru, saravas_v_e@mail.ru

КОМБИНИРОВАННОЕ ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАК МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ С ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ ЧАСТОТЫ

В статье рассмотрен метод комбинированного имитационного моделирования как инструмент для исследований гармонических искажений кривых тока (напряжения) в электрических сетях с преобразователями частоты с промежуточным звеном постоянного тока. Выполнен анализ полученных в результате имитационного моделирования амплитудно-частотных спектров входного тока преобразователей частоты с различными законами управления.

Гармонические искажения, интергармоники, имитационное моделирование, качество электроэнергии, амплитудный спектр, преобразователь частоты.

Введение. Все методы исследования электромеханических систем с преобразователями частоты условно можно разделить на аналитические и методы имитационного моделирования. Аналитические методы весьма удобны для анализа простых систем, но с ростом числа взаимовлияющих элементов математическое описание объекта исследования усложняется в геометрической прогрессии. Поэтому приходится вводить допущения о функционировании объекта, упрощающие математическое описание, и, как следствие, также упрощать систему и снижать точность модели, что не всегда является приемлемым. Для анализа сложных систем применимы методы имитационного моделирования.

С развитием вычислительной техники появилось новое направление моделирования – комбинированное, являющееся синтезом имитационного и аналитического моделирования, что привело к новым возможностям моделирования комплексных систем. Теперь модель представляет собой имитационный объект исследования, выраженный с помощью аналитических зависимостей. С ростом объема памяти и скорости вычислений персональных компьютеров стало возможным рассчитывать сложные аналитические выражения при сохранении наглядности имитационного моделирования [1].

Основным преимуществом метода комбинированного имитационного моделирования является то, что это стохастический подход, позволяющий учитывать влияние множественных случайных факторов. Этот метод позволяет построить адекватную модель сложной системы.

С точки зрения исследования явления распространения гармонических искажений в электрических сетях (ЭС) метод комбинированного имитационного моделирования является наиболее подходящим, т.к. он удовлетворяет ряду необходимых требований. Применение данного метода позволяет получить наглядную информацию о гармонических искажениях сетевого тока и напряжения, вносимых нелинейными элементами, в частности преобразователями частоты с промежуточным звеном постоянного тока (ПЧЗ). Также с помощью данного метода представляется возможным оценить степень гармонических искажений, вносимых в питающую сеть ПЧЗ, с учетом множества немаловажных факторов, которые при использовании других методов выносятся в допущения, снижая тем самым точность полученных результатов. С учетом того, что работа данного типа преобразователя связана с генерацией как высших гармоник (ВГ), так и гармоник с частотами, не кратными основной – интергармоник [2], возникает вопрос выбора корректного метода оценки частот и амплитуд гармонических составляющих в кривых входных параметров ПЧЗ.

Постановка задачи. Целью данной работы является определение уровней гармонических искажений, вносимых ПЧЗ с различными законами управления в питающую сеть, с применением метода комбинированного имитационного моделирования. Для достижения указанной цели необходимо получить и проанализировать амплитудно-частотные спектры входного тока преобразователя.

Материалы и результаты исследований. В ПЧЗ, представленном на рис. 1, производится двукратное преобразование напряжения питающей сети: сначала оно выпрямляется выпрямителем В, а затем постоянное напряжение с помощью инвертора И преобразуется в переменное напряжение (или ток). Инвертор может быть как автономным, так и ведомым, т.е. нагруженным на приемную сеть с фиксированной частотой. Выпрямитель и инвертор могут работать независимо друг от

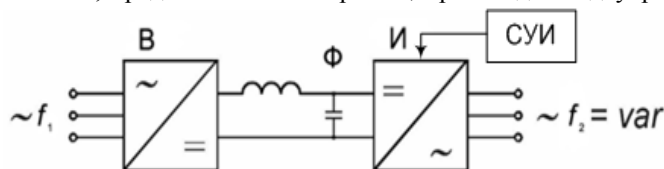


Рисунок 1 - Структурная схема силовой части преобразователя частоты с промежуточным звеном постоянного тока

друга, с естественной или с принудительной коммутацией. Коммутация силовых ключей выпрямительной и инверторной групп ПЧЗ вызывает определенные искажения во входном токе и напряжении.

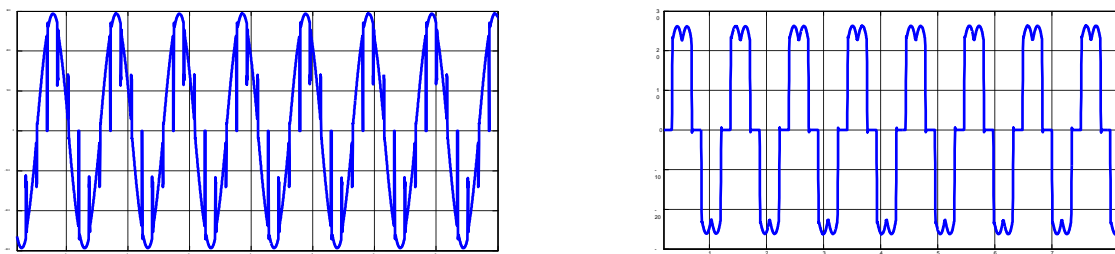
Для теоретических исследований работы системы ПЧЗ весьма эффективным является использование пакета MATLAB, содержащего в своем составе инструмент визуального моделирования Simulink [1]. Указанный пакет позволяет имитировать процессы, происходящие в электрических цепях с полупроводниковыми элементами, а также обладает полным набором средств моделирования автоматических систем управления.

При составлении модели ПЧЗ используются принятые в преобразовательной технике следующие допущения:

- источник питания является идеальным источником напряжения;
- цепи постоянного и переменного тока, включая нагрузку, содержат только линейные элементы, поэтому описываются линейными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами;
- ключевые элементы являются идеальными.

Сформулированные допущения приняты в большинстве работ по преобразовательной технике и не приводят к заметным погрешностям при расчете основных электромагнитных процессов [3].

Согласно структурной схеме ПЧЗ, представленной на рис. 1, была построена имитационная модель системы. Для примера работы модели на рис. 2 представлены кривые входных напряжения и тока ПЧЗ. Кривые исследуемых параметров, полученные в результате имитационного моделирования, соответствуют приведенным в [4], следовательно, динамику процесса модель воспроизводит адекватно.



а) б)
Рисунок 2 - Кривые входных напряжения а) и тока б) ПЧЗ

В результате проведения имитационных исследований работы системы ПЧЗ были получены спектральные характеристики входного тока преобразователя. Анализ гармонических спектров кривых входного тока ПЧЗ, полученных в результате имитационного моделирования, показал, что в спектре присутствуют как ВГ, так и интергармоники (ИГ). Для примера на рис. 3 представлен гармонический спектр входного тока ПЧЗ, полученный при моделировании системы с выходной частотой 15 Гц. В приведенном спектре входного тока присутствуют канонические гармоники со следующими значениями: 5-я – 58,1 % от основной, 7-я – 39,7 %, 11-я – 24,6 %, 13-я – 12,5 %. Полученный частотный спектр ВГ кривой входного тока ПЧЗ соответствует описанному в [4] и говорит о корректности работы имитационной модели.

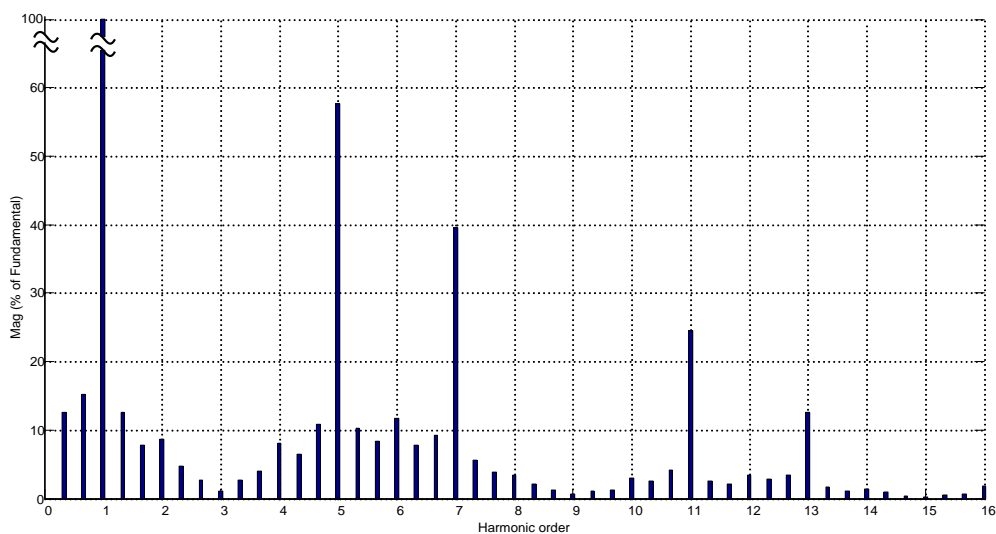


Рисунок 3 - Амплитудный спектр входного тока ПЧЗ

С помощью имитационных экспериментов исследовано влияние изменения выходной частоты рассматриваемого преобразователя на гармонический состав его сетевых параметров. В табл. 1 представлены сравнительные данные действующих значений гармонических составляющих входного тока ПЧЗ при различных значениях выходной частоты. Многочисленные модельные эксперименты показали, что спектр входного тока ПЧЗ имеет в своем составе наряду с ВГ также значительный спектр ИГ. Как видно из приведенных данных действующие значения ИГ кривых входного тока ПЧЗ не превосходят действующих значений ВГ. Анализ спектра, представленного на рис. 3, показывает, что амплитуды ИГ входного тока ПЧЗ также не превосходят амплитуды ВГ. Однако, учитывая, что спектр ИГ достаточно «густой», им нельзя пренебречь при решении вопросов качества электроэнергии в промышленных ЭС при работе рассматриваемых преобразовательных устройств.

Таблица 1 - Сравнение действующих значений входного тока ПЧЗ при различных значениях выходной частоты

Определяемый параметр	Выходная частота, Гц									
	15	18	25	31	35	40	45	50	55	60
Действующее значение входного тока, %	131,1	132,2	136,8	131,8	133,5	131,5	131,1	131,6	131,6	132,2
Основная гармоника входного тока, %	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Действующее значение ВГ входного тока, %	77,6	78,2	86,8	82,1	79,4	77,9	75,2	71,4	72,1	72,5
Действующее значение ИГ входного тока, %	35,6	37,3	34,5	25,5	40,1	35,2	39,2	47,3	46,1	47,1

В последнее время широкое распространение получили ПЧЗ с управлением с помощью пространственно-векторной широтно-импульсной модуляции (ШИМ). При ШИМ периодическая последовательность прямоугольных импульсов используется в качестве несущего колебания, а длительность этих импульсов является задающим сигналом [5, 6].

Зачастую одним из основных преимуществ, учитываемых при выборе ШИМ, как системы управления, указывается отсутствие ВГ на выходе преобразователя. Благодаря этому отсутствует дополнительный нагрев двигателя и снижение электромагнитного момента в колебаниях вала [7]. Однако для оценки электромагнитной совместимости ПЧЗ с ШИМ необходимо также учитывать и влияние преобразователя на питающую сеть. С этой целью была разработана имитационная модель ПЧЗ с ШИМ. Кривые входного тока и напряжения, иллюстрирующие работу модели, показаны на рис. 4.

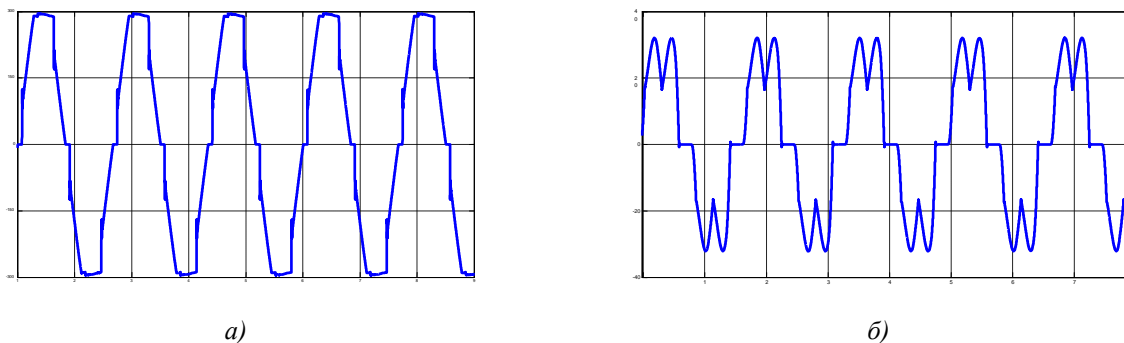


Рисунок 4 - Кривые входных напряжения а) и тока б) ПЧЗ с ШИМ

На рис. 5 представлен пример гармонического спектра входного тока ПЧЗ с ШИМ, полученного при моделировании системы с выходной частотой 15 Гц. В спектре присутствуют канонические гармоники со значениями: 5-я – 19,6 % от основной, 7-я – 14,1 %, 11-я – 8,5 %, 13-я – 7,2 %. Среди ИГ наиболее существенные значения имеют боковые составляющие основной гармоники при относительных частотах: $\nu = 0,33 - 8,5 \%$, $\nu = 0,66 - 13,8 \%$, $\nu = 1,33 - 10,4 \%$, $\nu = 1,66 - 4,9 \%$.

В табл. 2 представлены полученные с помощью имитационного моделирования действующие значения входного тока, а также соотношения между действующими значениями ВГ и ИГ входного тока ПЧЗ с ШИМ. Очевидно, что уровни как ВГ, так и ИГ в спектре входного тока ПЧЗ с ШИМ ниже, чем без использования данного метода задания сигнала управления вентилями преобразователя.

Как следует из данных, приведенных в табл. 2, амплитудный спектр входного тока ПЧЗ с ШИМ также содержит интергармонические составляющие во всем диапазоне изменения выходной частоты преобразователя. Анализ данных, представленных в табл. 1 и 2, показал, что при использовании ШИМ действующие значения

ВГ существенно снизились – в 1,7 – 2,9 раза. В то же время действующие значения ИГ уменьшились в среднем только на 40 %.

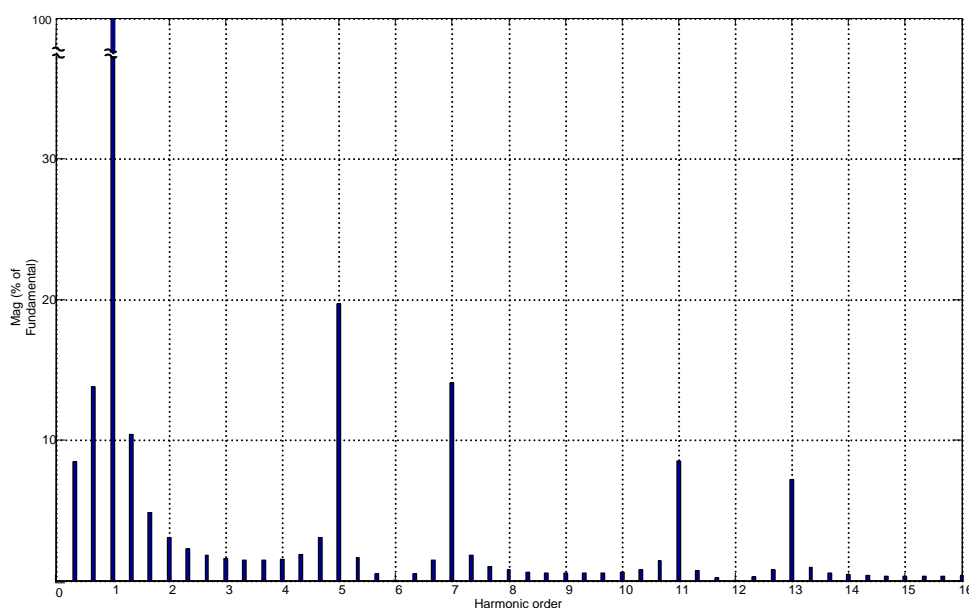


Рисунок 5 – Амплитудный спектр входного тока ПЧЗ с ШИМ

Таблица 2 - Сравнение действующих значений входного тока ПЧЗ с ШИМ при различных значениях выходной частоты

Определяемый параметр	Выходная частота, Гц									
	15	18	25	31	35	40	45	50	55	60
Действующее значение входного тока, %	106,2	108,6	112,4	109,8	109,6	108,1	108,5	109,1	109,4	110,1
Основная гармоника входного тока, %	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Действующее значение ВГ входного тока, %	26,8	39,2	50,2	40,5	38,2	36,2	34,2	33,8	34,2	34,2
Действующее значение ИГ входного тока, %	21,1	16,1	10,8	20,4	23,8	19,6	24,5	27,6	28,7	30,6

Выводы.

Для исследования несинусоидальных режимов в электрических сетях с преобразователями частоты целесообразно использовать метод комбинированного имитационного моделирования. С помощью данного метода показано, что амплитудный спектр входного тока ПЧЗ имеет в своем составе наряду со спектром ВГ также значительный спектр ИГ, которым нельзя пренебречь при решении вопросов качества электроэнергии в промышленных электрических сетях при работе рассматриваемых преобразовательных устройств. На спектральную картину входного тока ПЧЗ существенное влияние оказывает выбор системы управления формированием импульсов преобразователя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лазарев Ю. Моделирование процессов и систем в MATLAB. Учебный курс / Лазарев Ю. – СПб.: Питер; Киев: Издательская группа BHV, 2005. – 512 с.
2. Жежеленко И.В. Генерирование интергармоник нелинейными нагрузками и методы их расчета / И.В. Жежеленко, Ю.Л. Саенко, Т.К. Бараненко // 36. наук. пр. КНТУ “Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація”. – Кіровоград, 2004. – Вип. 15. – С. 3-9.
3. Теория и методы анализа преобразователей частоты и ключевых генераторов / [В. Ф. Дмитриков и др.]; под ред. В. Ф. Дмитрикова. – К.: Наук. думка, 1988. – 312 с.
4. Chang G. W. An analytical approach for characterizing harmonic and interharmonic currents generated by VSI-fed adjustable speed drives / Chang G. W., Chen Shin-Kuan // IEEE Transactions On Power Delivery. – October, 2005. – Vol. 20, No. 4. – P. 2585 – 2593.
5. Закладной А. Н. Энергозбереження засобами промислового електропривода: Навчальний посібник / А.Н. Закладной, А.В. Праховник, А.И. Соловей – К.: Кондор, 2005. – 408 с.

6. Чиженко И. М. Основы преобразовательной техники: [Учебник для вузов] / И. М. Чиженко, В. С. Руденко, В. И. Сенько – М.: Высшая школа, 1974. – 430 с.

7. Быков Ю. М. Помехи в системах с вентильными преобразователями / Ю. М. Быков, Ю. С. Василенко. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 152 с.

Надійшла до редколегії 11.04.2010

Рецензент: І.В.Жежеленко

Т. К. БАРАНЕНКО, В. Е. САРАВАС
Приазовський державний технічний університет

T. BARANENKO, V. SARAVAS
Pryazovskyi State Technical University

Комбіноване імітаційне моделювання як метод дослідження несинусоїдальних режимів в електричних мережах із перетворювачами частоти. В статті розглянуто метод комбінованого імітаційного моделювання, який використовується як інструмент для досліджень гармонійних спотворень кривих струму (напруги) в електричних мережах із перетворювачами частоти з проміжною ланкою постійного струму. Наведено аналіз отриманих у результаті імітаційного моделювання амплітудно-частотних спектрів вхідного струму перетворювачів частоти з різними законами управління.

Гармонійні спотворення, інтергармоніки, імітаційне моделювання, якість електроенергії, амплітудний спектр, перетворювач частоти.

Combined simulation modeling as method of research of nonsinusoidality modes in electric networks with frequency converters. The paper describes the method of combined simulation modeling as an instrument for researches of harmonic distortions of current (voltage) curves in the electric networks with the frequency converters with the intermediate DC link. Spectral analyses of input current of frequency converters with the variable control laws, which got as a result of simulation, are given.

Harmonic distortions, interharmonics, simulation, quality of electric power, amplitude spectrum, frequency converter.