

УДК 621.311.004.12

А. В. ГОРПИНИЧ – к. т. н., доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, gorpnich@ieeee.org  
И. А. ТАРАНЕНКО – магистр, Лодзинский технический университет, г. Лодзь, Польша, taranenko\_i\_a@ukr.net

## РЕАЛИЗАЦИЯ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ИСКАЖЁННЫХ КРИВЫХ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ НА ВЫХОДЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ ТИПА LS800-42K2-TD С ПОМОЩЬЮ УПРОЩЁННОЙ КОМПЛЕКСНОЙ WAVELET-ФУНКЦИИ МОРЛЕ

Статью представил д. физ.-мат. н., проф. В. И. Гаврилюк

В преобразователях частоты со звеном постоянного тока (ПЧП) для формирования выходного синусоидального переменного напряжения используют автономный инвертор, который формирует напряжение заданной формы на обмотках двигателя, как правило, методом широтно-импульсной модуляции (ШИМ). В качестве электронных ключей в инверторах применяются запираемые тиристоры GTO и их усовершенствованные модификации GCT, IGCT, SGCT или биполярные транзисторы с изолированным затвором IGBT, которые коммутируются с очень высокой скоростью нарастания выходного напряжения (до 50 кВ/мкс) и частотой следования импульсов (порядка 10...50 кГц). Это приводит к тому, что в кривой выходного напряжения

и в напряжении звена постоянного тока появляются высокочастотные составляющие напряжения с частотой в несколько килогерцы (соответственно, появляются и пульсации тока) [1]. В последние годы наблюдается широкомасштабное внедрение подобных современных преобразователей в регулируемом электроприводе, на солнечных и ветровых электростанциях (в том числе и с асинхронными генераторами двойного питания), в электромобилях, дизель-электрических системах тяги, тяги переменного тока и т.д. В качестве примера рассмотрим результаты исследований кривых напряжения и тока, выполненные в системе привода электромобиля (рис. 1) [2].

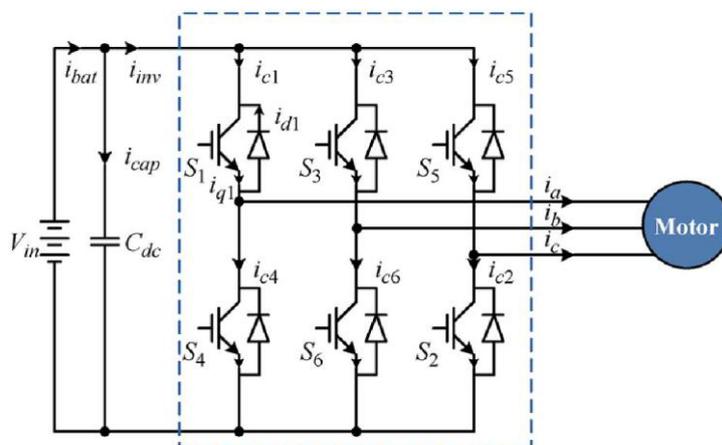


Рис. 1. Типовая схема системы привода электромобиля

Как видно из рис. 1, схема системы привода электромобиля имеет явное сходство со структурной схемой ПЧП с той лишь разницей, что отсутствует выпрямитель, вместо которого питание подаётся непосредственно от аккумуляторной батареи. Однако, учитывая тот факт, что источником высокочастотных составляющих является инвертор, результаты исследований кривых напряжения и тока [2] можно рассматривать в качестве исходной предпосылки для анализа высокочастотных составляющих в кривых напряжения и тока ПЧП. Полученные в результате измерений в системе привода электромобиля ток конденсатора звена постоянного тока и выходной фазный ток представлены на рис. 2 [2].

Анализ частотных спектров пульсирующего тока конденсатора звена постоянного тока для разных режимов работы и стратегий модуляции показал, что наибольшие величины высокочастотных составляющих имеют место при пространственно-векторной модуляции (space vector modulation (SVM)) в режиме, когда индекс модуляции равен  $M = 0,625$ , а коэффициент мощности нагрузки составляет  $\cos \varphi = 0,954$ . В этом

случае амплитуда составляющей 20 кГц равна 52 % от амплитуды фазного выходного тока, амплитуда составляющей 40 кГц – 14 %, амплитуда составляющей 60 кГц – 9,9 %, амплитуда составляющей 80 кГц – 9 %.

Получение частотного спектра подобных кривых тока и напряжения, а также временных характеристик их высокочастотных составляющих (длительность существования и периодичность возникновения) позволяет решать различные задачи электромагнитной совместимости (ЭМС): корректного выбора фильтров и способов экранирования, оценки влияния искажённых сигналов на конденсаторы звена постоянного тока, изоляцию обмоток приводимого двигателя, соединительного кабеля и т.п. Чтобы получить подробную информацию о высокочастотных составляющих сигнала со сложным спектральным составом и их временные характеристики, применяются различные преобразования, среди которых наиболее популярным является преобразование Фурье (ПФ). Однако кроме ПФ существует и много других: преобразование Гильберта-Хуанга, преобразование Вигнера, преобразование Уолша, wavelet-преобразование и т.д.

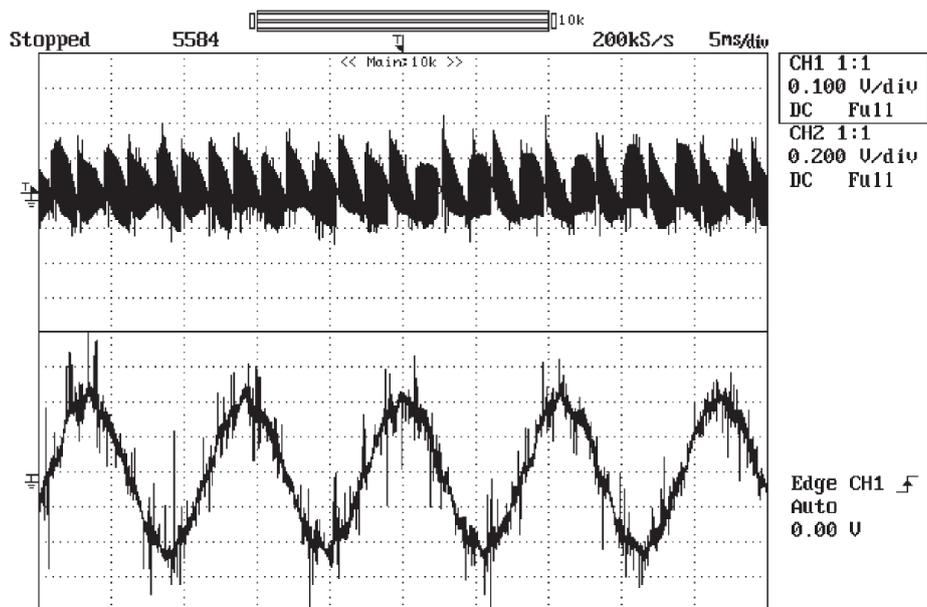


Рис. 2. Полученные в результате измерений в системе привода электромобиля ток конденсатора звена постоянного тока (верхняя кривая) и выходной фазный ток (нижняя кривая)

Результатом ПФ сигнала, заданного во временной области, является его спектральное представление. ПФ является обратимым образованием, т.е. из его коэффициентов посредством обратного преобразования может быть получен исходный сигнал, но в каждый момент времени доступным является только лишь одно из представлений: частотную информацию нельзя извлечь из временной, а временную – из частотной. ПФ даёт частотную информацию, содержащуюся в сигнале, т.е. даёт количественную оценку содержания каждой частоты. При этом предполагается, что составляющая данной частоты существует на протяжении всего времени существования сигнала. На практике же данный случай является лишь частным, так как реальные сигналы не всегда обладают стационарностью – свойством процесса не менять свои характеристики с течением времени. Для анализа явно нестационарных процессов применяются преобразования, дающие частотно-временное представление сигнала. До появления wavelet-преобразования широко применялось оконное преобразование Фурье, которое, однако, уступает wavelet-преобразованию по всем параметрам. Ещё с начала прошлого века исследователям было понятно, что широко используемый спектральный анализ, предусматривающий разложение по базису гармонических функций, не применим к системам с меняющимися во времени характеристиками. В качестве примера можно привести высказывание Л. И. Мандельштама, который еще в 1920-х годах отмечал, что «физическое значение разложения Фурье в большой мере связано с резонансными свойствами линейных систем с постоянными параметрами; при переходе к линейным системам с переменными параметрами разложение Фурье перестает быть целесообразным, и место функций  $\cos$  и  $\sin$  должны занять другие функции».

Необходимость создания новых инструментов анализа структуры сигналов, кото-

рые могли бы эффективно применяться для обработки нестационарных процессов в динамике систем различной природы, привело к появлению ряда оригинальных подходов. Важный шаг был сделан А. Гроссманом и Ж. Морле в 1980-х годах, когда они продемонстрировали возможность анализа произвольных нестационарных сигналов с помощью единственной функции – «материнской wavelet-функции»  $\psi(t)$ , осуществляя ее перемасштабирование и смещение. Дальнейшее построение современной wavelet-теории, «индуцированное» исследованиями А. Гроссмана и Ж. Морле, связано с именами И. Мейера, И. Добеши, С. Малла и многих других. В настоящее время wavelet-анализ превратился в мощнейший инструмент изучения частотно-временной структуры сигналов, широко используемый почти во всех естественных науках и многих областях техники.

Наряду с созданием wavelet-теории не прекращаются попытки развития альтернативных методов частотно-временного анализа нестационарных процессов, наиболее значимой среди которых является разработка метода эмпирических мод, называемого также «преобразованием Гильберта-Хуанга». Существует мнение, что этот подход может превосходить wavelet-анализ с точки зрения частотно-временного разрешения [3].

Цель работы – представить результаты исследований искажённых кривых тока и напряжения на выходе ПЧП типа LS800-42K2-TD, полученных с помощью цифрового осциллографа типа АКТАКОМ АСК-2034, а также скейлограммы исследованных сигналов (графические интерпретации их частотно-временного представления) и их wavelet-преобразования в виде 3D-зависимостей, полученные в среде Wolfram Mathematica с помощью так называемой «упрощённой комплексной wavelet-функции Морле».

Для выполнения исследований была собрана опытная установка, состоящая из

следующих элементов: ПЧП типа LS800-42K2-TD, реактора, ненагруженного асинхронного двигателя типа АИРМ80А4У3, делителя напряжения, измерительных токовых клещей типа Fluke i5s и цифрового осциллографа типа АКТАКОМ АСК-2034 (рис. 3 – 6). Осциллограммы фазного тока на выходе ПЧП и линейного напряжения на клеммах двигателя представлены на рис. 7, 8.



Рис. 3. ПЧП типа LS800-42K2-TD.  
Входные параметры: 3Ф ~ 380...460 В; 50/60 Гц. Выходные параметры: 3Ф ~ 0...460 В; 0,1...400 Гц; 5,7 кВА; 7,5 А

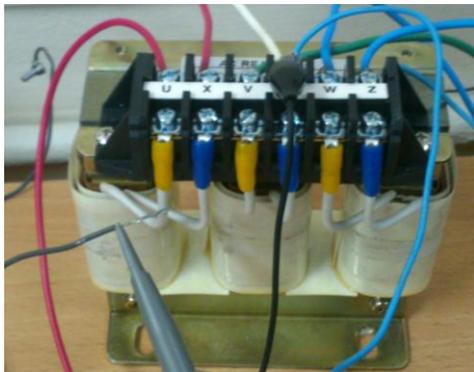


Рис. 4. Реактор. Параметры:  
3Ф ~ 380...460 В; 50/60 Гц



Рис. 5. Ненагруженный асинхронный двигатель типа АИРМ80А4У3. Параметры: 3Ф ~ 380 В; 50 Гц; 1,1 кВт; 1390 об/мин;  $\cos \phi = 0,81$

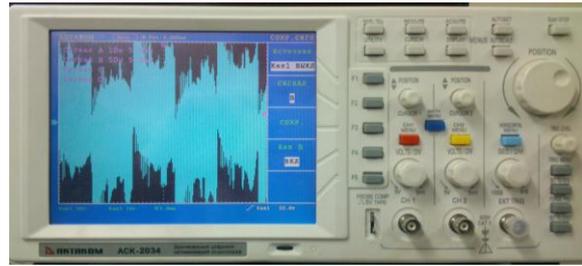


Рис. 6. Двухканальный цифровой осциллограф типа АКТАКОМ АСК-2034. Параметры: полоса частот 25 МГц, частота дискретизации 100 МГц

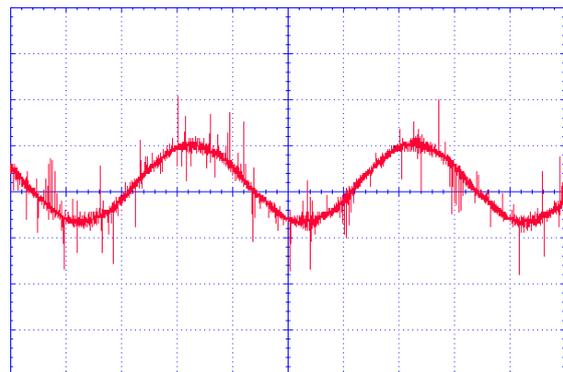


Рис. 7. Осциллограмма фазного тока на выходе ПЧП

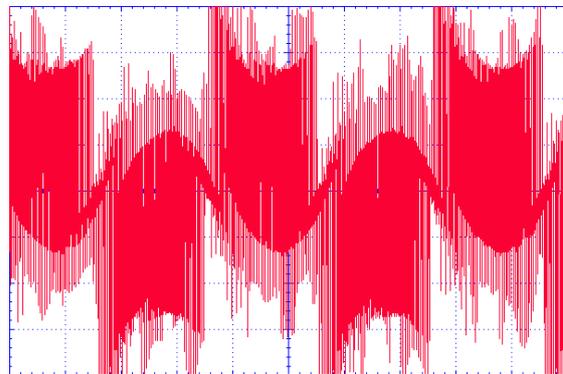


Рис. 8. Осциллограмма линейного напряжения на клеммах двигателя

Визуальный анализ полученных осциллограмм показывает, что представленная на рис. 7 кривая фазного тока имеет форму, сходную с кривой фазного тока, полученной в результате исследований в системе привода электромотоцикла (см. рис. 2). Совмещённые осциллограммы выходного фазного тока показаны на рис. 9, 10 [2]. Можно заключить, что сходство кривых выходного фазного тока объясняется работой ключей инвертора, которые коммутируются с ча-

стотой порядка нескольких кГц [4] (для ПЧП типа LS800-42K2-TD частота ШИМ по паспорту составляет от 2 до 16 кГц).

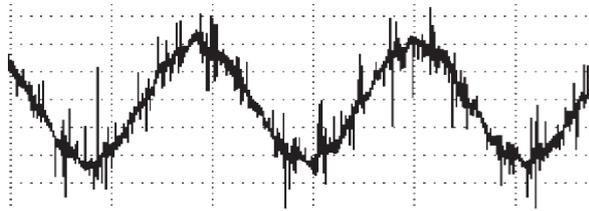


Рис. 9. Осциллограмма фазного тока на выходе инвертора системы привода электромобиля

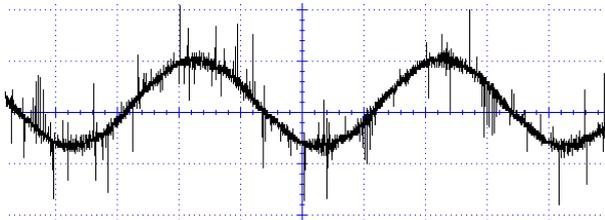


Рис. 10. Осциллограмма фазного тока на выходе ПЧП

Форма кривой линейного напряжения на клеммах двигателя (рис. 8) представляет собой достаточно сложный сигнал, возникающий вследствие наложения на синусоиду многочисленных групп высокочастотных импульсов большой скважности.

Визуальный анализ показывает, что спектральный состав этой кривой должен характеризоваться наличием ансамбля периодически возникающих стационарных и нестационарных высокочастотных составляющих импульсного характера.

Для выявления особенностей амплитудно-частотно-временного представления отдельных высокочастотных составляющих, содержащихся в полученных искажённых кривых фазного тока на выходе ПЧП и линейного напряжения на клеммах двигателя, исходя из вышеуказанного визуального анализа и соображений эмпирического характера, был использован достаточно мощный математический аппарат wavelet-преобразования.

Непрерывное wavelet-преобразование определяется следующим образом [5]:

$$Wf(u, s) = \langle f, W_{u,s} \rangle = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi^* \left( \frac{t-u}{s} \right) dt, \quad (1)$$

где  $s$  – параметр масштаба;  $f(t)$  – преобразуемый сигнал;  $\psi(t)$  – функция преобразования («материнский wavelet»);  $\psi^*(t)$  – комплексно-сопряжённая величина от wavelet-функции  $\psi(t)$ ;  $u$  – параметр сдвига по времени.

Упрощённый комплексный wavelet Морле – complex Morlet wavelet (CMW) – это особенным образом модулированная функция Гаусса, интегрированная в алгоритм гармонического анализа [6, 7]. Она является исключительно полезной для гармонического анализа благодаря своей плавности и форме, сходной с гармоникой. CMW имеет следующий вид:

$$\Psi(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi f_b}} e^{-\frac{t^2}{f_b}} e^{j2\pi f_c t}, \quad (2)$$

где  $f_b$  – параметр полосы частот;  $f_c$  – центральная частота wavelet-функции.

Представим сигнал  $f(t)$  как

$$f(t) = a(t) \cos \varphi(t). \quad (3)$$

Wavelet-функция в выражении (2) может быть представлена как [8]

$$\Psi(t) = g(t) e^{j\eta t}. \quad (4)$$

Сдвинутые и растянутые по времени wavelet-семейства можно выразить в виде

$$\Psi_{u,s}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \Psi \left( \frac{t-u}{s} \right) = e^{-j\xi u} g_{s,u,\xi}(t), \quad (5)$$

где  $g_{s,u,\xi}(t) = \sqrt{s} g \left( \frac{t-u}{s} \right) e^{j\xi t}$ ;  $\xi = \frac{\eta}{s}$ .

Wavelet-преобразование сигнала  $f(t)$ , представленного выражением (3), имеет вид аналогичный приведенному в [8].

$$Wf(u, s) = \frac{\sqrt{s}}{2} a(u) e^{j\varphi(u)} (\tilde{g}(s[\xi - \varphi'(u)], -\varphi'(u)]) + \varepsilon(u, \xi)) \quad (6)$$

где  $\tilde{g}(\omega)$  соответствует ПФ функции  $g(t)$ .

Поправочным членом  $\varepsilon(u, \xi)$  в выражении (6) можно пренебречь, если сигнал содержит только лишь одну частотную составляющую. Если же сигнал содержит гармонические частоты от низких до высоких, то необходимо учитывать влияние  $\varepsilon(u, \xi)$  на wavelet-коэффициенты.

Нормализованная скейлограмма определяется как [8, 9]

$$\frac{\xi}{\eta} P_w f(u, \xi) = \frac{|Wf(u, s)|^2}{s} \quad (7)$$

и рассчитывается с помощью выражения

$$\frac{\xi}{\eta} P_w f(u, \xi) = \frac{1}{4} a^2(u) \left| \tilde{g}\left(\eta\left[1 - \frac{\varphi'(u)}{\xi}\right]\right) + \varepsilon(u, \xi) \right|^2 \quad (8)$$

Так как  $|\tilde{g}(\omega)|$  в выражении (8) достигает максимума при  $\omega = 0$ , то если пренебречь поправочным членом  $\varepsilon(u, \xi)$ , в соответствии с выражением (8) максимум скейлограммы будет при

$$\frac{\eta}{s(u)} = \xi(u) = \varphi'(u) \quad (9)$$

Точки  $(u, \xi(u))$ , рассчитанные по выражению (9), называются «wavelet-хребтами» [10]. Аналитически амплитуда определяется следующим выражением:

$$a(u) = \frac{2|Wf(u, s)|}{\sqrt{s}} \quad (10)$$

Таким образом, приведенный выше алгоритм с точки зрения математической реализации является универсальным, а использование предложенной Tse функции

CMW наилучшим образом подходит к анализу сколь угодно искажённых сигналов, форма которых близка к синусоидальной либо содержит гармонические составляющие, которые накладываются на неё.

Полученные с помощью цифрового осциллографа АКТАКОМ АСК-2034 осциллограммы (рис. 7, 8) были сохранены в памяти осциллографа и перенесены на компьютер в формате Microsoft Excel при помощи необходимого программного обеспечения. Для анализа полученных сигналов была разработана специальная программа в среде Wolfram Mathematica, математической основой для которой послужил представленный выше алгоритм. Блок-схема программы показана на рис. 11.

На первом этапе работы программы данные в формате Microsoft Excel импортируются в Wolfram Mathematica как одноэлементный трёхмерный массив. Затем осуществляется понижение степени вложенности – в данном случае происходит превращение одноэлементного трёхмерного массива в двумерный, состоящий из координатных пар «время-напряжение». После этого выполняется исключение временных данных путём превращения двумерного массива в одномерный, так как именно такой вид данных необходим для дальнейшей работы.

На втором этапе выполняется непрерывное wavelet-преобразование. Для этого необходимо заранее ввести общее количество октав и голосов. Октавы представляют собой последовательные полосы масштабов, начальный и конечный масштабы которых соотносятся как 1:2. Количество октав позволяет регулировать диапазон преобразования, отталкиваясь от наиболее высоких частот и двигаясь в сторону более низких. Голоса представляют собой разбиения октав на некоторые промежутки, предопределённое количество которых позволяет получить необходимое разрешение в частотной области.

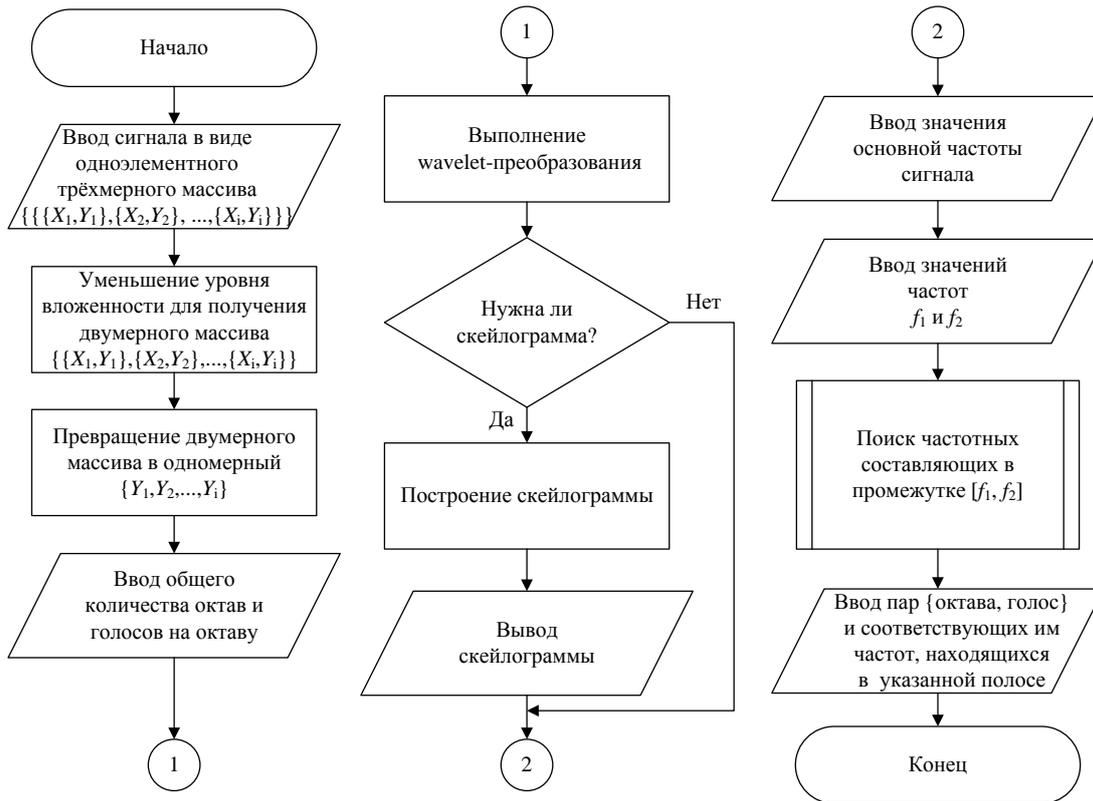


Рис. 11. Блок-схема программы

По окончании выполнения описанных выше действий программа переходит к выполнению самого преобразования, после чего можно построить скейлограмму – графическую интерпретацию частотно-временного представления обрабатываемого сигнала. Однако получаемый результат не является в общем случае удобным к применению в инженерной практике, так как все значения частот «зашифрованы» в значениях масштабов, которые соответствуют определённым парам «октава-голос». Получение искомой информации в явном виде требует проведения дальнейших операций. Для начала необходимо ввести полосу частот, в пределах которой будет выполняться поиск пар «октава-голос». Непосредственно процесс поиска обобщён в подпрограмму и указан на блок-схеме соответствующим образом (рис. 11). Конечным результатом программы является вывод пар «октава-голос», а также соответствующих частот, находящихся в заданной полосе. Полученные данные могут быть

применены к выведенной скейлограмме.

Для выполнения wavelet-преобразования использовалось wavelet-семейство Морле, позволяющее получить в данном случае наилучшее разрешение по частоте. В результате анализа были выявлены высокочастотные составляющие в пределах 0,76–97,31 кГц. Полученные скейлограммы приведены на рис. 12 – 15.

Скейлограмма является частотно-временным представлением сигнала, т.е. отображает информацию о том, какие частоты присутствуют в сигнале, и информацию о времени возникновения и существования отдельных частотных составляющих. Насыщенность цвета говорит об энергии, выделяющейся за время существования той или иной составляющей. Ось абсцисс скейлограммы – точки отсчётов по времени, количество которых соответствует частоте дискретизации преобразуемого сигнала. Ось ординат представляет собой логарифмическую шкалу масштабов вида  $-\log_2(s)$ , разделённую на октавы.

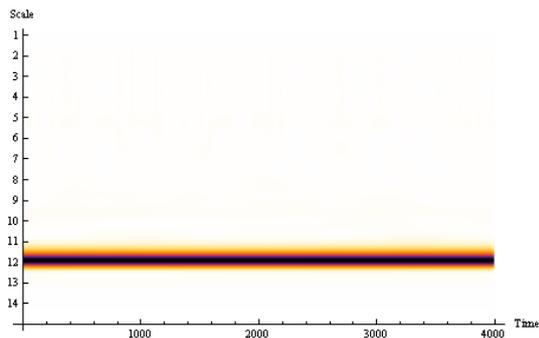


Рис. 12. Полная скейлограмма фазного тока

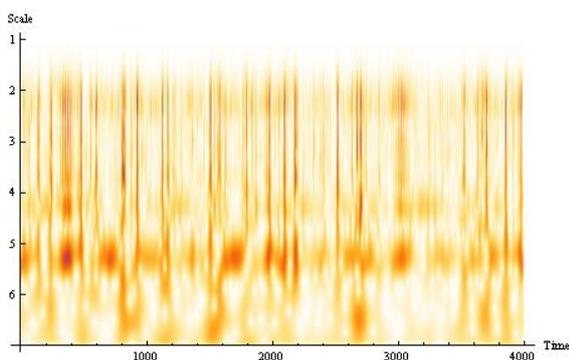


Рис. 13. Скейлограмма фазного тока для диапазона частот 1,8...111,8 кГц

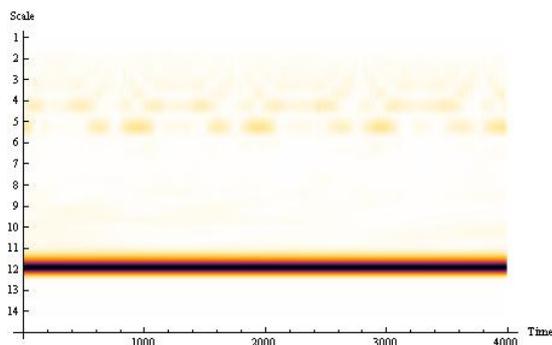


Рис. 14. Полная скейлограмма линейного напряжения

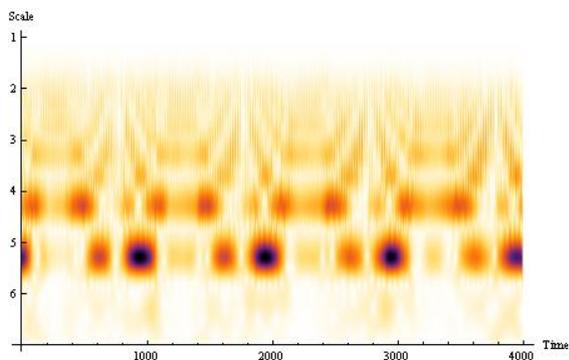


Рис. 15. Скейлограмма линейного напряжения для диапазона частот 1,8...111,8 кГц

С помощью разработанной программы получены также и анимированные частотные спектры фазного тока на выходе ПЧП и линейного напряжения на клеммах двигателя, наглядно отображающие изменения частотного наполнения исследуемых сигналов для любого момента времени в пределах всего периода их регистрации (на рис. 16, 17 представлены частотные спектры для разных моментов времени).

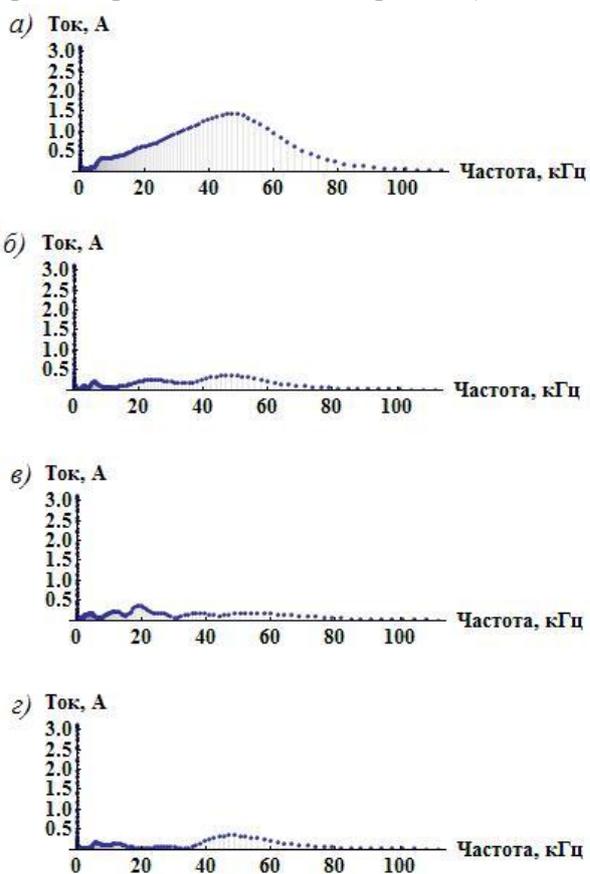


Рис. 16. Частотные спектры фазного тока на выходе ПЧП для разных моментов времени: а) 4,85 мс; б) 9,70 мс; в) 15,85 мс; г) 36,15 мс

Из представленных на рис. 16, 17 зависимостей видно, что количественное соотношение амплитуд различных высокочастотных составляющих не является постоянным во времени, что позволяет утверждать о нестационарности исследуемых процессов. Для получения более детальной

інформації необхідно отобразити одно-  
 временно амплитудно-частотную и частотно-  
 временную плоскости, т.е. реализовать ам-  
 плитудно-частотно-временное представле-  
 ние всего сигнала сложной формы в виде  
 3D-зависимости, для чего была разработана  
 специальная подпрограмма. На рис. 18 по-  
 казаны такие 3D-зависимости, причём низ-  
 кие значения амплитуд обозначены оттен-  
 ками зелёного цвета, а высокие – фиолето-  
 вого.

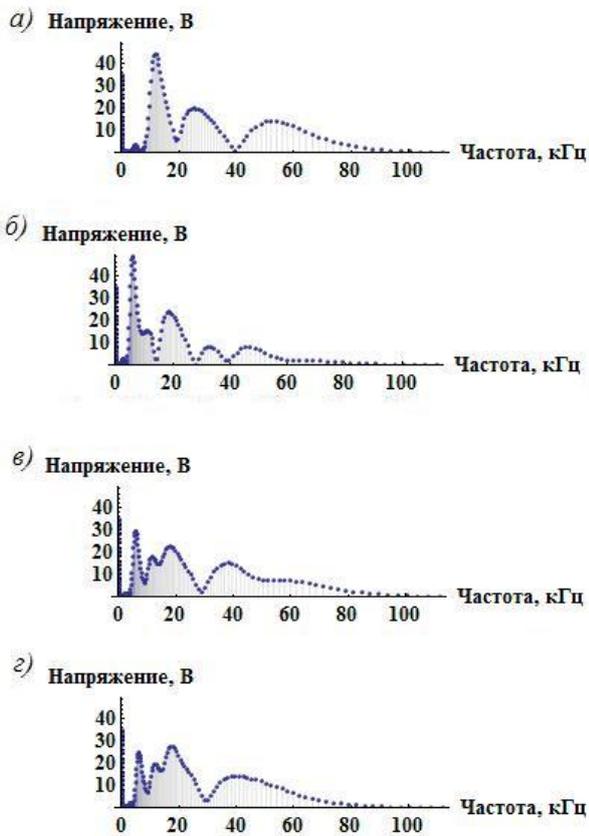


Рис. 17. Частотные спектры линейного  
 напряжения на клеммах двигателя для разных  
 моментов времени:

а) 4,85 мс; б) 9,70 мс; в) 15,85 мс; г) 36,15 мс

Следует отметить, что на рис. 18 оси  
 времени имеют размерность отсчётов, как и  
 оси абсцисс скейлограмм. Полученные 3D-  
 зависимости позволяют выявить присут-  
 ствие высокочастотных составляющих зна-  
 чительных амплитуд в диапазоне

1...100 кГц. Составляющие таких частот  
 нельзя однозначно отнести к гармониче-  
 ским искажениям, поскольку в соответ-  
 ствии со стандартом CISPR гармонически-  
 ми искажениями считаются искажения с  
 частотами от 50 Гц до 9 кГц. В полученном  
 диапазоне частот 1...100 кГц согласно рис.  
 19 присутствуют как гармонические иска-  
 жения, так и кондуктивные электромагнит-  
 ные помехи (ЭМП), так как кондуктивными  
 ЭМП в соответствии со стандартом CISPR  
 считаются частотные составляющие диапа-  
 зона 9 кГц...30 МГц [11].

Чтобы с достаточной степенью точности  
 определить значения амплитуд отдельных  
 частотных составляющих, в среде Wolfram  
 Mathematica также была разработана спе-  
 циальная подпрограмма. Особый интерес  
 представляют амплитуды высокочастотных  
 составляющих, кратных частоте коммута-  
 ции инвертора  $f_1 = 3040$  Гц. Максимальные  
 значения амплитуд этих составляющих,  
 выраженное в процентах по отношению к  
 амплитуде основной частоты, приведены в  
 табл. 1.

Таблица 1

Максимальные значения амплитуд  
 высокочастотных составляющих,  
 кратных частоте коммутации  
 инвертора

Частота, Гц	Максимальные значения амплитуд, %	
	Фазный ток на выходе ПЧП	Линейное напря- жение на клеммах двигателя
760,2	3,8	7,7
1520,4	3,4	5,7
3040,8	7,1	21,0
6081,6	18,9	199,1
12163,2	24,5	178,9
24326,4	38,3	175,8
48652,8	78,4	156,3
97305,6	4,3	7,9

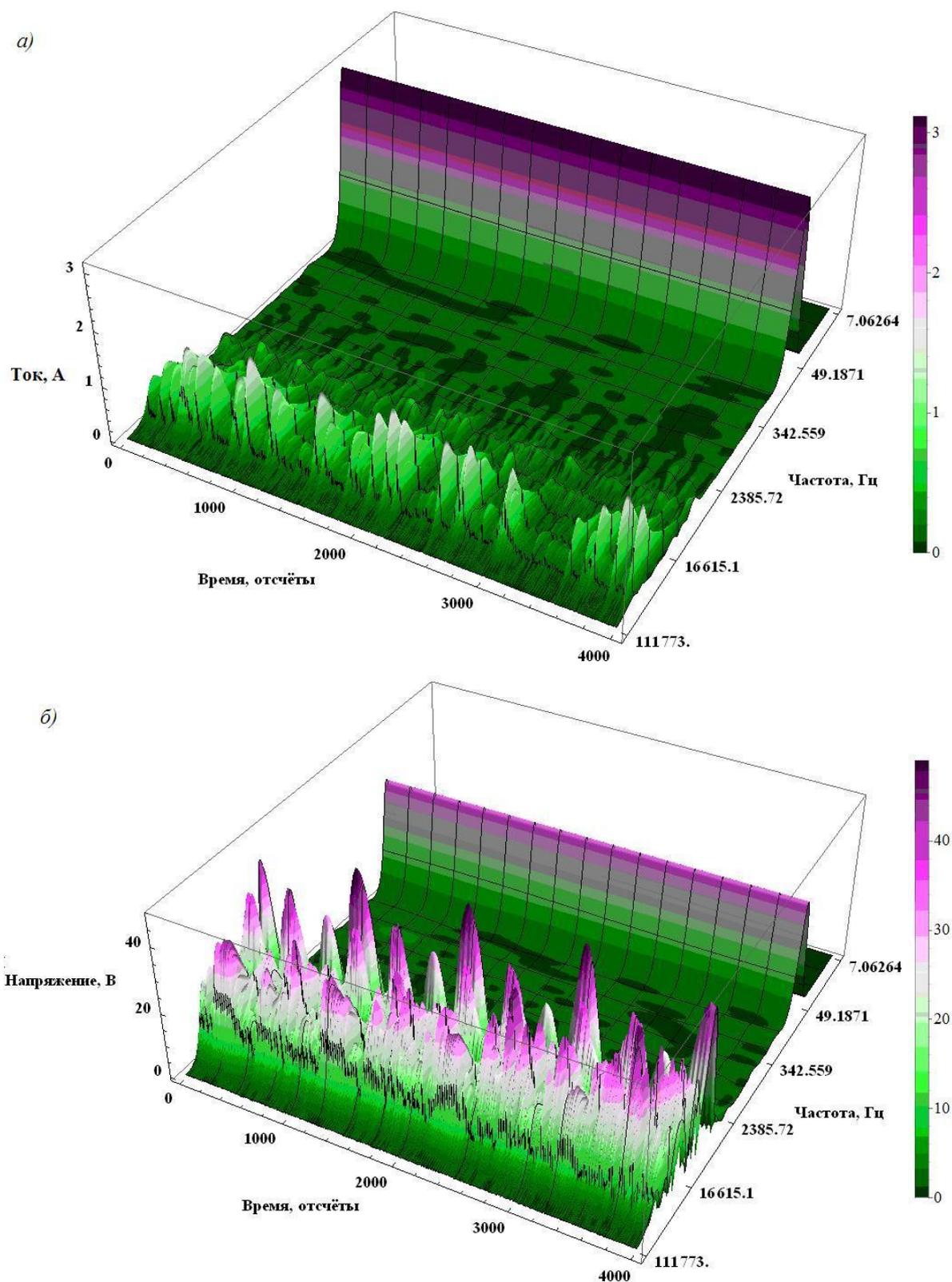


Рис. 18. 3D-представление wavelet-преобразования сигналов:  
а) фазного тока на выходе ПЧП; б) линейного напряжения на клеммах двигателя

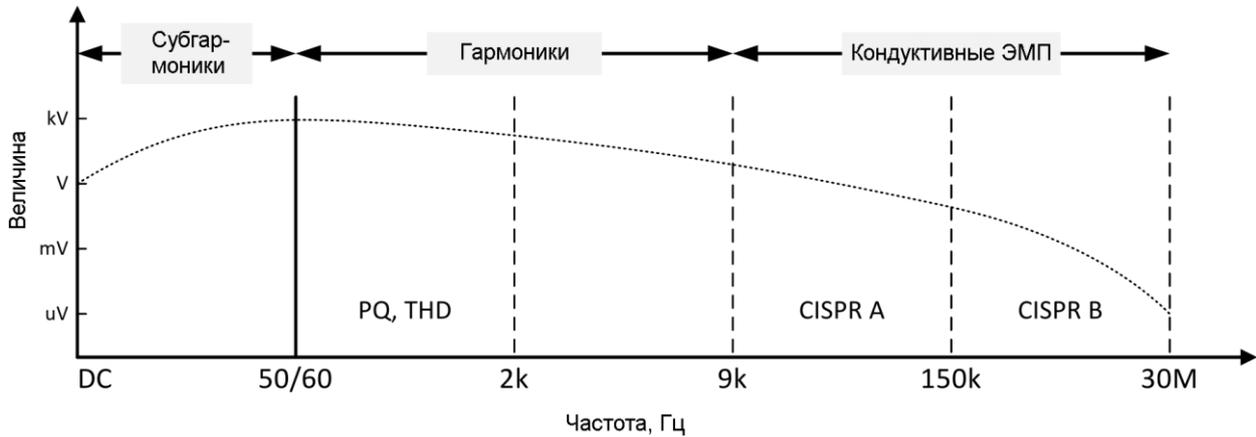


Рис. 19. Поддиапазоны гармонических искажений

Таким образом, амплитудно-частотно-временное представление анализируемых сигналов позволило установить, что в спектральном составе присутствуют высокочастотные составляющие с амплитудами до 199 % по напряжению и до 78 % по току от амплитуды основной частоты. Длительность этих составляющих достигает десятков микросекунд-единиц миллисекунд, а фронт близок к прямоугольному. Полученные значения амплитуд и длительностей свидетельствуют о том, что высокочастотные составляющие с такими параметрами по своему характеру соответствуют коммутационным импульсам тока и напряжения, параметры которых нормируются стандартами ИЕС. Например, амплитуды перенапряжений, вызванных коммутацией вентиля низковольтных преобразователей, могут достигать 150 % от амплитуды напряжения основной частоты (периодично) или даже 250 % (непериодично), поэтому стандарт ИЕС 61800 рекомендует их учитывать при проектировании [12].

Наличие высокочастотных составляющих значительной амплитуды в диапазоне 0,76...97,31 кГц оказывает негативное влияние на конденсаторы звена постоянного тока, изоляцию обмоток приводимого двигателя, а также изоляцию соединительного кабеля. Кроме того, возможно возникновение резонансных явлений на таких частотах,

приводящих к выходу из строя элементов преобразователя частоты и двигателя. Электромагнитное излучение, обусловленное наличием таких высокочастотных составляющих, способно ухудшить работу систем связи, неэкранированного измерительного оборудования, электронных счётчиков, модулей микропроцессорной защиты с программируемыми логическими контроллерами, а также может негативно сказываться на здоровье обслуживающего персонала.

Для подавления вышеуказанных высокочастотных составляющих наибольшее распространение получили пассивные фильтры в виде L-C-L-цепочек различных конфигураций [12], что, однако, не исключает и возможности применения активных фильтров.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Кривые линейного напряжения и тока на выходе ПЧП типа LS800-42K2-TD имеют достаточно сложный спектральный состав, особенностью которого является наличие ансамбля периодически возникающих стационарных и нестационарных высокочастотных составляющих импульсного характера, поскольку для формирования выходного синусоидального переменного напряжения в данном преобразователе используется автономный инвертор, который

формирует напряжение заданной формы на обмотках двигателя методом широтно-импульсной модуляции.

2. В среде Wolfram Mathematica с помощью так называемой «упрощённой комплексной wavelet-функции Морле» реализовано амплитудно-частотно-временное представление сигналов фазного тока на выходе ПЧП и линейного напряжения на клеммах приводимого двигателя. В результате анализа были выявлены высокочастотные составляющие в диапазоне 0,76...97,31 кГц. Используя специальный алгоритм определения частот и амплитуд отдельных гармонических составляющих, были получены анимированные частотные спектры фазного тока на выходе ПЧП и линейного напряжения на клеммах двигателя, наглядно отображающие изменения частотного наполнения исследуемых сигналов для любого момента времени в пределах всего периода их регистрации. Также была разработана специальная подпрограмма, позволяющая представить в виде 3D-зависимостей wavelet-преобразования исследуемых сигналов.

3. Этот же алгоритм позволил получить скейлограммы исследуемых сигналов – графические интерпретации их частотно-временного представления. Скейлограмма отображает информацию о том, какие частоты присутствуют в сигнале, и информацию о времени возникновения и существования отдельных частотных составляющих. Насыщенность цвета говорит об энергии, выделяющейся за время существования той или иной составляющей, т.е. можно судить о спектральной плотности мощности.

4. Амплитудно-частотно-временное представление анализируемых сигналов позволило установить, что в спектральном составе присутствуют высокочастотные составляющие с амплитудами до 199 % по напряжению и до 78 % по току от амплитуды основной частоты. Длительность этих составляющих

достигает десятков микросекунд-единиц миллисекунд, а фронт близок к прямоугольному. Полученные значения амплитуд и длительностей свидетельствуют о том, что высокочастотные составляющие с такими параметрами по своему характеру соответствуют коммутационным импульсам тока и напряжения, параметры которых нормируются стандартами IEC.

5. Вопросы ЭМС ПЧП требуют дальнейших исследований.

### Библиографический список

1. Горпинич, А. В. Оценка срока службы конденсаторов звена постоянного тока частотного преобразователя серии SINAMICS S120 фирмы Siemens [Текст] / А. В. Горпинич, А. С. Вербин // Энергетика, энергосбережения на початку XXI століття: всеукраїнська наук.-практ. конф. молодих учених, спеціалістів, аспірантів, 20 березня 2014 р.: тези доповідей. – Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2014. – С. 106.
2. Analysis and evaluation of DC-link capacitors for high-power-density electric vehicle drive systems [Text] / H. Wen, W. Xiao, X. Wen, P. Armstrong // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2012. – Vol. 61. – No. 7. – P. 2950-2964.
3. Павлов, А. Н. Частотно-временной анализ нестационарных процессов: концепции вейвлетов и эмпирических мод [Текст] / А. Н. Павлов, А. Е. Филатова, А. Е. Храмов // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. – 2011. – Т. 19. – № 2. – С. 141-157.
4. Measures for the limitation of voltage distortion in the kHz range [Text] / K. Krueger, M. Sonnenschein, C. Unger, R. Zurowski // Proc. 7<sup>th</sup> International Power Engineering Conference (IPEC 2005). – 29 November – 2 December 2005. – Singapore – P. 1-5.

5. Tse, N. C. F. Practical application of wavelet to power quality analysis [Text] / N. C. F. Tse // Proc. IEEE Power Engineering Society General Meeting. – 18-22 June 2006. – Montreal, Quebec (Canada). – P. 1-5.
6. Huang, S.-J. Application of morlet wavelets to supervise power system disturbances [Text] / S.-J. Huang, C.-T. Hsieh, C.-L. Huang // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1999. – Vol. 14. – No. 1. – P. 235-243.
7. Teolis, A. Computational signal processing with wavelets [Text] / A. Teolis. – Boston, Massachussets: Birkhauser, 1998. – 324 p. – ISBN 0-8176-3909-8.
8. Mallat, S. A wavelet tour of signal processing [Text] / S. Mallat. – St. Luis, Missouri: Academic Press, 1998. – 577 p. – ISBN 0-12-466605-1.
9. Carmona, R. A. Multiridge detection and time-frequency reconstruction [Text] / R. A. Carmona, W. L. Hwang, B. Torresani // IEEE Transactions on Signal Processing. – 1999. – Vol. 47. – No. 2. – P. 480-492.
10. Carmona, R. A. Characterization of signals by the ridges of their wavelet transforms [Text] / R. A. Carmona, W. L. Hwang, B. Torresani // IEEE Transactions on Signal Processing. – 1997. – Vol. 45. – No. 10. – P. 2586-2590.
11. Zobaa, A. Power quality issues [Text] / A. Zobaa. – Rijeka, Croatia: InTech, 2013. – 300 p. – ISBN 978-953-51-1068-2.
12. Disturbances due to voltage distortion in the kHz range – experiences and mitigation measures [Text] / C. Unger, K. Krueger, M. Sonnenschein, R. Zurowski // Proc. 18<sup>th</sup> International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2005). – 6-9 June 2005. – Turin (Italy). – P. 1-4.

**Ключові слова:** електромагнітна сумісність, перетворювач частоти з ланкою постійного струму, широтно-імпульсна модуляція, високочастотні складові струму та напруги, wavelet-перетворення, скейлограма.

**Ключевые слова:** электромагнитная совместимость, преобразователь частоты со звеном постоянного тока, широтно-импульсная модуляция, высокочастотные составляющие тока и напряжения, wavelet-преобразование, скейлограмма.

**Keywords:** electromagnetic compatibility, frequency converter with dc-link, pulse-width modulation, high-frequency current and voltage components, wavelet-transform, scalogram.

Поступила в редколлегию 10.05.2014