

УДК 621.314.263

ББК 31.291

Д.Г. САДИКОВ, В.Г. ТИТОВ

**АНАЛИЗ ГАРМОНИЧЕСКОГО СОСТАВА ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ,
ПОТРЕБЛЯЕМОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ ЧАСТОТЫ**

Ключевые слова: преобразователь частоты, питающая сеть, гармоники, фильтр, электромагнитная совместимость.

Представлены результаты исследования гармонического состава тока и напряжения, потребляемого преобразователями частоты. Рассмотрено влияние преобразователей частоты на питающую сеть. Расчеты показали, что без проведения специальных мероприятий, таких как установка фильтров, работа большинства преобразователей частоты оказывает негативное влияние на питающую сеть, искажая кривые тока и напряжения выше допустимых пределов. Произведен анализ способов подавления высших гармоник.

D. SADIKOV, V. TITOV**ANALYSIS OF HARMONIC COMPOSITION OF CURRENT
AND VOLTAGE CONSUMED BY FREQUENCY CONVERTERS**

Key words: frequency converter, power supply grid, harmonics, filter, electromagnetic compatibility.

The present article covers the issues of investigating a harmonic composition of the current and voltage consumed by frequency converters, the influence of frequency converters on the power supply grid. Calculations have shown, that without special measures such as the installation of filters, the work of most frequency converters has a negative impact on the power supply grid resulting in deforming curves of the current and voltage above admissible limits. The article also presents the results of the analysis of methods aimed to suppress higher harmonics.

Наибольшее применение для широкодиапазонного регулирования частоты вращения асинхронных двигателей в настоящее время получили преобразователи частоты (ПЧ) с двойным преобразованием энергии. Такие устройства преобразуют электроэнергию питающей сети в электроэнергию с требуемыми значениями напряжения, тока и частоты в два этапа. На первом этапе с помощью выпрямителя производится преобразование тока и напряжения сети с частотой 50 Гц в постоянные ток и напряжение. На втором этапе постоянные ток и напряжение преобразуются в переменные, но уже с новыми, требуемыми для обеспечения желаемого режима работы электродвигателя значениями тока, напряжения и частоты [1, 2]. Такой способ преобразования энергии имеет ряд недостатков, один из которых связан с наличием на входе таких ПЧ полупроводникового выпрямителя, который искажает форму тока и напряжения питающей сети.

Генерация в питающую сеть высших гармоник тока и напряжения и возникающие при этом отклонения параметров качества электроэнергии от значений, регламентируемых ГОСТ 13109-97¹, может существенно ограничивать применение ПЧ.

Применение модуляционных методов управления силовыми электронными ключами в случае управляемого выпрямителя и многоуровневых схем инверторов позволяет эффективно решить задачу электромагнитной совмести-

¹ ГОСТ 13109-97 Нормы качества электрической энергии. М.: Стандартинформ, 2006. 32 с.

тимости (ЭМС) ПЧ с питающей сетью. Ряд фирм-производителей для улучшения формы выходного напряжения устанавливает на выходе ПЧ емкостные или индуктивно-емкостные (синусные) фильтры, что повышает стоимость преобразователя, а также ухудшает его массогабаритные характеристики. Без использования выходных фильтров ЭМС обеспечивается в многоуровневых схемах ПЧ.

Для уменьшения влияния ПЧ на питающую сеть и обеспечения требований ЭМС применяются следующие технические решения: установка фильтра на входе ПЧ; дроссель в звене постоянного тока ПЧ; увеличение количества пульсаций напряжения (так называемой «пульсности») входного выпрямителя за период питающего напряжения; применение управляемого выпрямителя на входе ПЧ, использующего специальный алгоритм управления ключами; использование активного фильтра гармоник.

Установка фильтров высших гармоник или применение дросселя в звене постоянного тока ПЧ дают примерно одинаковый эффект и позволяют эффективно бороться с эмиссией высших гармоник в питающую сеть. Такой способ используется для преобразователей малой и средней мощности. Для преобразователей большой мощности габаритные размеры фильтра становятся сравнимы с самим ПЧ, что вызывает сложности с установкой его в производственных помещениях. Стоимость такого фильтра также очень высока.

В качестве примера проведен расчет гармоник на шинах РУНН-0,4 кВ КТП 10/0,4, мощностью 1600 кВА, к которому подключено 30 преобразователей частоты.

Таблица 1

Исходные данные для расчета

Параметр	Значение
Сетевые параметры:	
первичное напряжение, кВ	10
напряжение на низкой стороне, кВ	0,4
частота сети, Гц	50
мощность КЗ на вводе ВН трансформатора, МВА	100
Параметры трансформатора:	
номинальная мощность, кВА	1600
напряжение короткого замыкания, %	6,0
напряжение на низкой стороне, кВ	0,4
векторная группа	D Y0
Параметры привода:	
тип преобразователя частоты	ATV61HD30N4
мощность преобразователя частоты, кВт	30
количество преобразователей, шт.	30
тип сетевого дросселя (на каждый ПЧ)	VW3A4556

Расчетная схема представлена на рис. 1.

Форма тока и напряжения на стороне 10 (точка PCC1), 0,4 (точка PCC2) кВ питающего трансформатора представлена на рис. 2, 3. Расчет проводился в программе Harmonics Simulation Tool version 1.08.0.

Результаты расчета гармонического состава питающего напряжения представлены в табл. 2.

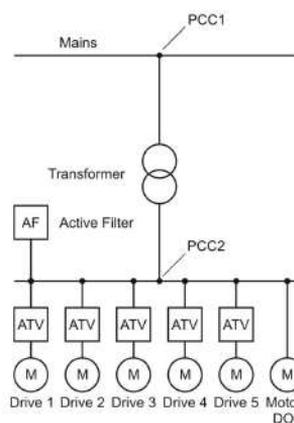


Рис. 1. Расчетная схема

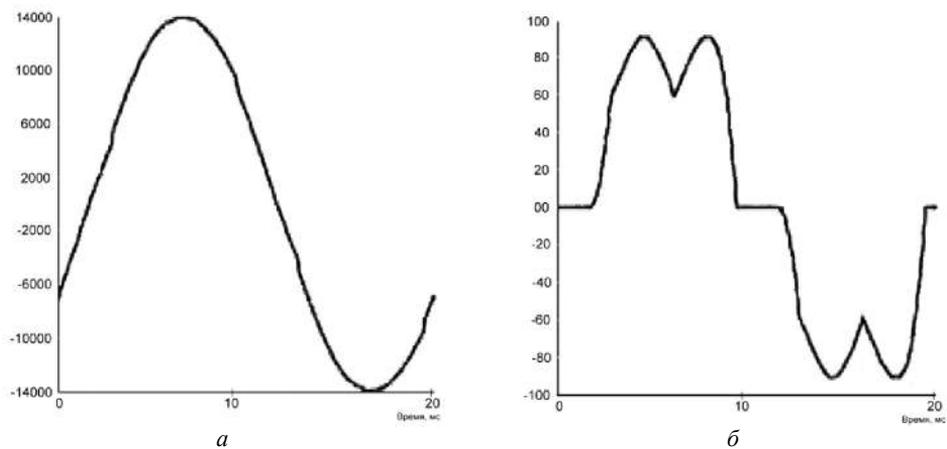


Рис. 2. Форма напряжения (а) и тока (б) на стороне 10 кВ

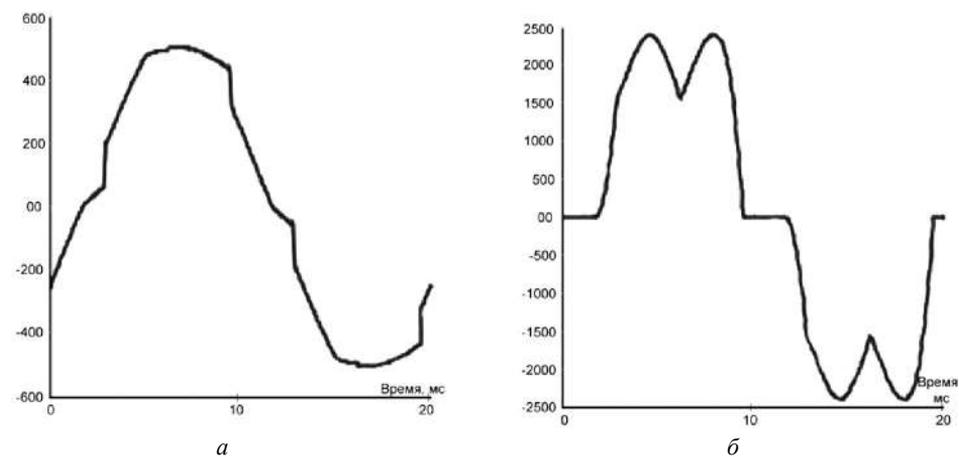


Рис. 3. Форма напряжения (а) и тока (б) на стороне 0,4 кВ

Таблица 2

Процентное содержание высших гармоник на стороне 10, 0,4 кВ

Гармоники напряжения (10 кВ)	%	Гармоники тока (10 кВ)	%	Гармоники напряжения (0,4 кВ)	%	Гармоники тока (0,4 кВ)	%
5	1,3181	5	25,1048	5	6,3985	5	25,1048
7	0,5587	7	7,6033	7	2,7122	7	7,6033
11	0,5612	11	4,8616	11	2,7247	11	4,8616
13	0,4489	13	3,2905	13	2,1793	13	3,2905
17	0,2705	17	1,5166	17	1,3135	17	1,5166
19	0,2755	19	1,3817	19	1,3375	19	1,3817
23	0,2155	23	0,8931	23	1,0465	23	0,8931
25	0,1844	25	0,7028	25	0,8951	25	0,7028
29	0,187	29	0,6147	29	0,9081	29	0,6147
31	0,172	31	0,5289	31	0,8353	31	0,5289
35	0,1367	35	0,3723	35	0,6638	35	0,3723
37	0,1375	37	0,3543	37	0,6678	37	0,3543
41	0,1218	41	0,2831	41	0,5913	41	0,2831
43	0,1112	43	0,2466	43	0,5401	43	0,2466
47	0,1119	47	0,2268	47	0,543	47	0,2268
49	0,1066	49	0,2075	49	0,5179	49	0,2075
THDv	1,7643	THDi	27,0068	THDv	8,5651	THDi	27,0068

Как видно из результатов расчета, коэффициент нелинейных искажений тока даже при использовании сетевых дросселей составляет $THDi = 27\%$, что выше максимально допустимого значения (12%). Коэффициент нелинейных искажений напряжения $THDv$ не превышает допустимого по ГОСТ 13109-97 значения. Чтобы показатели качества электроэнергии не превышали максимально допустимые значения, для рассматриваемого примера наилучшим решением является применение активных фильтров.

Для ПЧ большой мощности применяются 6-, 12- или 18-пульсные сетевые выпрямители на диодах или SCR-тиристорах, что позволяет ограничить в спектре высших гармоник 5-ю и 7-ю либо также 11-ю и 13-ю гармоники. Увеличение числа пульсаций входного напряжения выпрямителя за период сетевой частоты достигается путем применения одного или нескольких трансформаторов с разным фазовым сдвигом вторичных обмоток и нескольких, последовательно соединенных неуправляемых выпрямителей. Применение 24-пульсных схем выпрямления способно практически полностью решить проблему ЭМС ПЧ с питающей сетью. Однако этот способ требует дополнительных капитальных затрат из-за сложности изготовления многообмоточного согласующего трансформатора и очень большого числа силовых полупроводниковых элементов в выпрямительном силовом каскаде ПЧ.

В качестве примера расчетные данные гармонического состава тока и напряжения на шинах ЗРУ-10 кВ при работе четырех ПЧ типа MV7616, мощностью 11,5 МВт с 24-пульсной схемой входного выпрямителя приведены на рис. 4.

Как видно из рис. 4, гармонический состав входного тока и напряжения соответствует требованиям ГОСТ 13109-97 даже без применения входных фильтров высших гармоник. Однако такой способ требует применения двух входных согласующих трансформаторов с разными группами соединения обмоток.

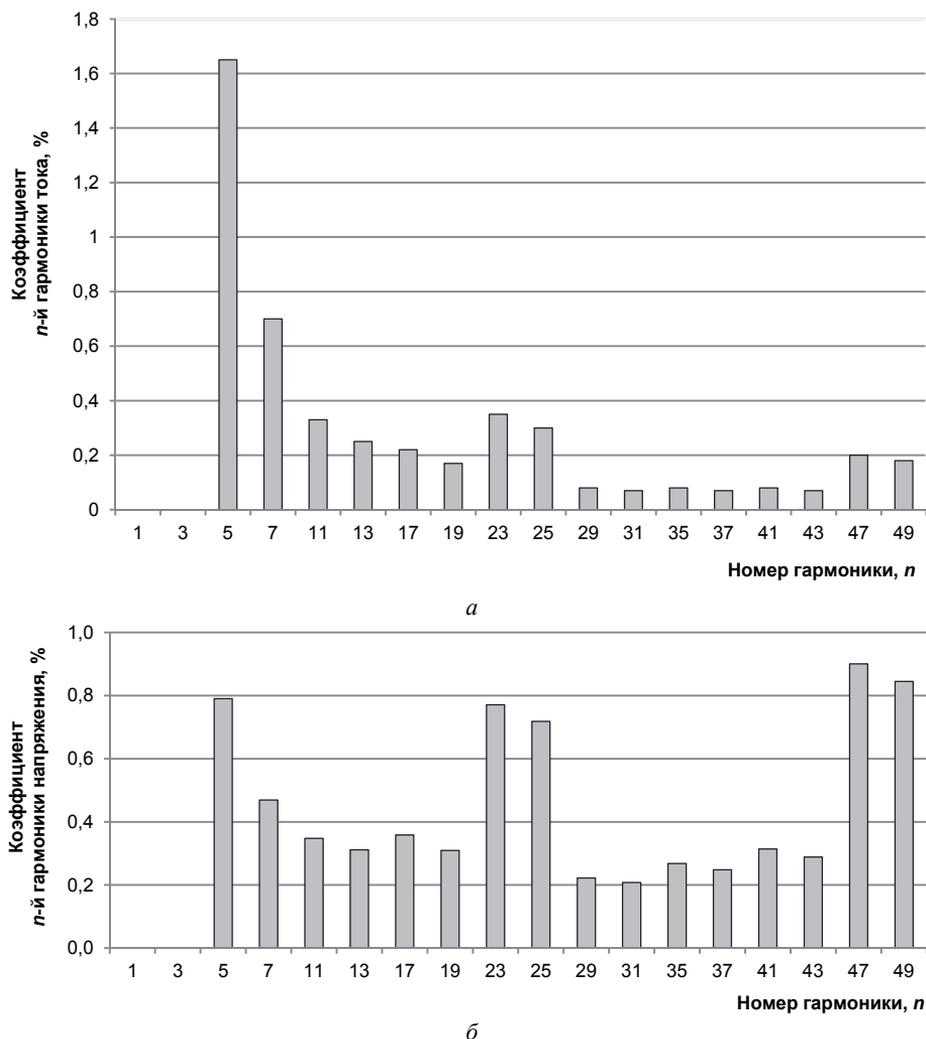


Рис. 4. Результаты расчета гармонического состава питающего тока (а) и напряжения (б) ПЧ типа MV7616 ф. Convertteam.

Наиболее эффективным способом обеспечения ЭМС ПЧ с питающей сетью является использование активного сетевого выпрямителя, представляющего собой мало искажающий сеть электроснабжения управляемый выпрямитель на силовых ключах с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). Такой способ применяется, как правило, при сопряжении высоковольтных ПЧ со «слабыми» сетями электроснабжения, в которых соотношение мощностей сети и подключенных преобразователей находится в пределах

$$\frac{S_{\text{кз сети}}}{S_{\text{ПЧ}}} < (30...35),$$

где $S_{\text{кз сети}}$ – мощность короткого замыкания питающей сети на стороне 10 кВ; $S_{\text{ПЧ}}$ – суммарная мощность высоковольтных ПЧ. Активный компенсатор гармо-

ник генерирует в распределительную сеть гармоники, потребляемые соответствующей нелинейной нагрузкой, но с противоположной фазой. В результате этого ток и напряжение в сети остаются синусоидальными.

Важной задачей с точки зрения обеспечения ЭМС ПЧ является оптимизация алгоритма управления ключами ПЧ таким образом, чтобы гармонический состав напряжений и токов на входе и выходе преобразователя оставался оптимальным во всех режимах работы агрегата.

Стоит отметить, что наиболее удачной топологией ПЧ с точки зрения обеспечения ЭМС с питающей сетью является схема многоуровневого автономного инвертора напряжения [3]. Такие ПЧ при работе не вызывают значительных искажений тока и напряжения и способны работать без дополнительно устанавливаемых фильтров.

Использование фильтров и увеличение пульсаций входного напряжения выпрямителя являются действенными способами подавления высших гармоник, генерируемых ПЧ в питающую сеть. Применение активных фильтров практически полностью решает проблему ЭМС с питающей сетью. Выбор оптимального способа подавления высших гармоник должен основываться на предварительно проведенных расчетах и сравнении различных вариантов.

Литература

1. Лезнов Б.С. Частотно-регулируемый электропривод насосных установок. М.: Машиностроение, 2013. 176 с.
2. Лазарев Г.Б. Частотно-регулируемый электропривод насосных и вентиляторных установок // Силовая электроника. 2007. № 3. С. 41–48.
3. Садиков Д.Г. Выбор перспективной топологии построения преобразователя частоты для электроприводного газоперекачивающего агрегата // Инженерный вестник Дона. 2014. № 1. URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2014/2244> (дата обращения 10.08.2014).

References

1. Leznov B.S. *Chastotno-reguliruemiy elektropriwod nasosnykh ustanovok* [Variable frequency drives pump units]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2013. 176 p.
2. Lazarev G.B. *Chastotno-reguliruemiy elektropriwod nasosnykh i ventilyatornykh ustanovok* [Variable frequency drives pump and fan units]. *Silovaya elektronika* [Power Electronics]. 2007, no. 3, pp. 41–48.
3. Sadikov D.G. *Vybor perspektivnoi topologii postroeniya preobrazovatelya chastoty dlya elektropriwodnogo gazoperekachivayushchego agregata* [Selection of promising topology construction for a frequency converter of electrically driven gas pumping unit]. *Inzhenernyi vestnik Dona* [Engineering journal of Don], 2014, no. 1, Available at: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2014/2244> (Accessed 10 Aug. 2014).

САДИКОВ ДМИТРИЙ ГЕННАДЬЕВИЧ – аспирант кафедры электрооборудования судов, Нижегородский государственный технический университет, Россия, Нижний Новгород (dima_sd5@mail.ru).

SADIKOV DMITRIY – post-graduate student of Ships Electric Equipment Chair, Nizhny Novgorod State Technical University, Russia, Nizhny Novgorod.

ТИТОВ ВЛАДИМИР ГЕОРГИЕВИЧ – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электрооборудования судов, Нижегородский государственный технический университет, Россия, Нижний Новгород.

TITOV VLADIMIR – doctor of technical sciences, professor, head of Ships Electric Equipment Chair, Nizhny Novgorod State Technical University, Russia, Nizhny Novgorod.
