

**Е. Г. Алаев,**  
**ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспор-**  
**та»**  
**(г. Новосибирск, Россия)**

**В. М. Зырянов, Н. А. Митрофанов,**  
**ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет»**  
**(г. Новосибирск, Россия)**

## ГАРМОНИЧЕСКИЙ СОСТАВ НАПРЯЖЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ MITSUBISHI FR-A540ECR

Электродвигатели в составе частотно-регулируемых электроприводов эксплуатируются в режимах, характеризующихся существенным изменением значений питающего напряжения и частоты. При этом напряжение на зажимах электродвигателя содержит широкий спектр гармоник значительной амплитуды [1]. В отличие от общепринятого значения термин «гармонический состав напряжения» (подразумевающий наличие основной гармоники, соответствующей промышленной частоте питающей сети, и набора кратных этой частоте высших гармоник) получает в данном случае несколько иной смысл.

При изменении частоты напряжения на выходе преобразователя частоты (ПЧ) в процессе регулирования скорости двигателя изменяется и частота основной гармоники. Соответственно, все гармонические составляющие выходного напряжения имеют частоты, кратные этому значению основной гармоники. Если при анализе качества электроэнергии в системах электроснабжения номер гармоники традиционно ассоциируется с ее частотой в герцах, то в рассматриваемом случае номер гармоники становится неинформативным параметром. Здесь правильнее анализировать частотный спектр непосредственно в герцах. При изменении скорости вращения двигателя основная гармоника соответствует этой скорости, т. е. принимает любые значения, не связанные с частотой питающей сети. В свою очередь, частоты высших гармоник также принимают любые значения, кратные основной частоте. Таким образом, если обычно в системах электроснабжения гармонический состав подразумевается как набор фиксированных частот (дискретный спектр), то спектр на выходе ПЧ является непрерывным (возможна любая частота гармонических составляющих).

Ниже приведены результаты эксперимента по исследованию гармонического состава напряжения на входе ( $U_{ВХ}$ ) и выходе ( $U_{ВЫХ}$ ) ПЧ Mitsubishi FR-A540ECR. Структурная схема экспериментальной установки приведена на рисунке 1. Регистрация напряжения выполнялась цифровым осциллографом Aktakom АСК-3117 с частотой дискретизации 50кГц.

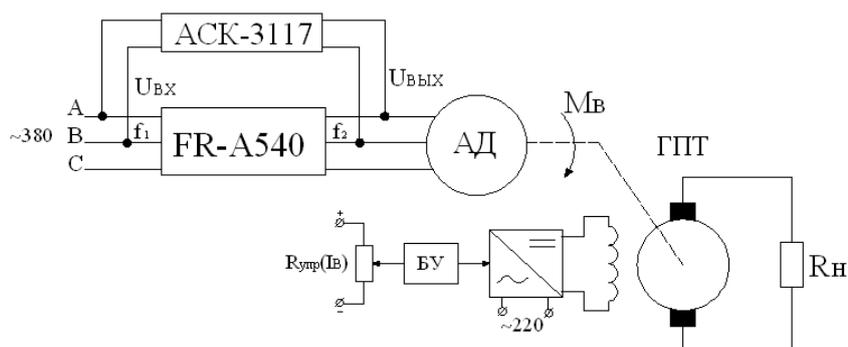


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки

Основные паспортные данные оборудования:

- 1) преобразователь частоты Mitsubishi FR-A540ECR (без сглаживающих дросселей),  $P_H = 3,7$  кВт;  $U_H = 380$  В;  $I_H = 3,6$  А;
- 2) трёхфазный асинхронный двигатель DMK 2/RC/3,  $P_H = 1,6$  кВт;  $U_H = 380/220$  В;  $I_H = 3,8/6,6$  А;  $\cos\phi = 0,79$ ;
- 3) генератор постоянного тока П-22,  $P_H = 1,0$  кВт;  $U_H = 220$  В;  $I_H = 5,9$  А.
- 4) нагрузочное сопротивление  $R_H = 36$  Ом.

Анализ гармонического состава выполнялся разложением исходных осциллограмм в ряд Фурье [2]. Количественно степень влияния каждой гармоники на форму кривой напряжения оценивается коэффициентом гармоники  $k_n$ :

$$k_n = \frac{U_n}{U_1} * 100\% .$$

где  $U_n$  – действующее значение напряжения (тока) n-й гармоники;

$U_1$  – действующее значение напряжения (тока) 1-й гармоники.

Степень искажения формы кривой напряжения от совокупного влияния всех гармоник оценивается коэффициентом искажения синусоидальности напряжения:

$$k_u = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^m U_n^2}}{U_1} * 100\% .$$

Гармонический анализ выполнялся при варьировании частоты и нагрузки электропривода. На рисунке 2 приведены примеры осциллограмм на входе и выходе преобразователя при нагрузке, равной  $P_H = 1$  кВт и частоте  $f_2 = 40$  Гц.

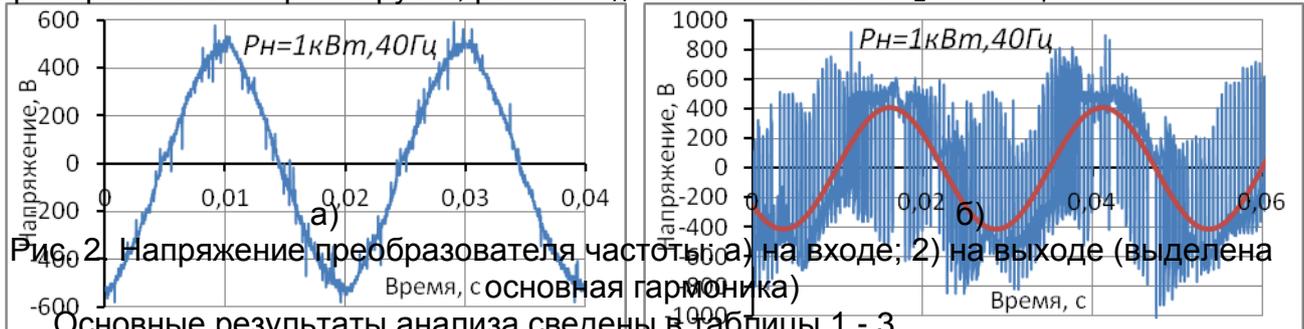


Рис. 2. Напряжение преобразователя частоты: а) на входе; б) на выходе (выделена основная гармоника)

Основные результаты анализа сведены в таблицы 1 - 3.

В таблице 1 коэффициенты искажения рассчитаны в соответствии с ГОСТ 32144-2013 [3] на качество электроэнергии (до 40-ой гармоники, включительно).

Таблица 1.

Коэффициент искажения синусоидальности напряжения ПЧ по ГОСТ 32144-2013

Точка контроля	$f_2 = 35$ Гц				$f_2 = 40$ Гц					
	$P_H = 0.25$ кВт	$P_H = 0.5$ кВт	$P_H = 1$ кВт		$P_H = 0.25$ кВт	$P_H = 0.5$ кВт	$P_H = 1$ кВт	$P_H = 1.27$ кВт		
	Коэффициент искажения $K_U$ , %									
Вход ПЧ	4,510	4,750	4,400		4,480	4,280	4,770	4,380		
Выход ПЧ	33,44	26,45	23,72		26,08	25,39	25,77	26,83		
Точка контроля	$f_2 = 45$ Гц					$f_2 = 50$ Гц				
	$P_H = 0.25$ кВт	$P_H = 0.5$ кВт	$P_H = 1$ кВт	$P_H = 1.5$ кВт	$P_H = 1.6$ кВт	$P_H = 0.25$ кВт	$P_H = 0.5$ кВт	$P_H = 1$ кВт	$P_H = 1.5$ кВт	$P_H = 2$ кВт
	Коэффициент искажения $K_U$ , %									
Вход ПЧ	4,360	4,440	4,400	4,490	4,670	4,450	4,200	4,110	4,420	4,410
Выход ПЧ	33,76	22,12	24,12	30,05	19,02	30,23	40,68	47,38	32,23	39,08

Таблица 2

Коэффициент искажения синусоидальности напряжения ПЧ с учетом всего спектра гармоник (до 500-й, включительно)

$f_2 = 35$ Гц	$f_2 = 40$ Гц

Точка контроля	$P_H = 0,25$ кВт		$P_H = 0,5$ кВт		$P_H = 1$ кВт		$P_H = 0,25$ кВт		$P_H = 0,5$ кВт		$P_H = 1$ кВт		$P_H = 1,27$ кВт								
	Коэффициент искажения $K_U, \%$																				
Вход ПЧ	7,3500		7,1700		6,8600		6,6400		6,2800		8,3700		7,7100								
Выход ПЧ	129,32		119,72		121,73		116,29		114,54		117,36		110,89								
$f_2 = 45$ Гц							$f_2 = 50$ Гц														
Точка контроля	$P_H = 0,25$ кВт		$P_H = 0,5$ кВт		$P_H = 1$ кВт		$P_H = 1,5$ кВт		$P_H = 1,6$ кВт		$P_H = 0,25$ кВт		$P_H = 0,5$ кВт		$P_H = 1$ кВт		$P_H = 1,5$ кВт		$P_H = 2$ кВт		
	Коэффициент искажения $K_U, \%$																				
Вход ПЧ	6,890		7,320		7,440		7,410		6,970		6,220		7,110		6,990		6,540		6,700		
Выход ПЧ	98,79		70,08		90,08		84,14		94,01		54,35		66,69		79,55		61,27		69,79		

В таблице 3 приведены наиболее характерные для каждого режима ПЧ гармоник.

Таблица 3.

Гармонический состав напряжения на выходе ПЧ при вариации нагрузки и частоты выходного напряжения  $f_2$

$f_2 = 35$ Гц						$f_2 = 40$ Гц					
f, Гц	$P_H = 0,25$ кВт	$P_H = 0,5$ кВт	$P_H = 1$ кВт	f, Гц	$P_H = 0,25$ кВт	$P_H = 0,5$ кВт	$P_H = 1$ кВт	$P_H = 1,27$ кВт			
Коэффициент n-ой гармоники, %						Коэффициент n-ой гармоники $k_n, \%$					
140	10,04	6,80	7,63	120	4,34	10,47	11,18	9,90			
315	8,54	8,09	7,58	1840	10,27	15,84	19,90	11,94			
1855	9,80	8,49	9,86	1880	17,09	10,46	10,88	2,23			
1890	9,60	17,17	14,41	1920	29,93	25,60	15,69	19,40			
1925	13,99	19,95	15,89	2000	52,59	52,16	61,04	48,53			
1995	68,15	68,19	72,53	2080	31,82	24,01	12,80	18,02			
2030	19,11	9,59	5,90	2120	12,89	14,39	12,94	4,87			
2135	18,07	7,05	20,68	2160	13,62	20,75	25,09	16,19			
3885	9,03	9,01	12,38	2200	11,83	6,48	3,42	14,75			
3955	35,83	24,56	28,91	3800	12,09	7,67	18,34	10,38			
3990	10,06	23,01	12,58	3880	14,02	9,99	10,10	12,21			
4025	19,10	35,97	29,60	3960	31,31	29,85	32,88	27,98			
4060	24,42	7,92	17,11	4040	26,07	31,49	34,07	35,50			
4130	12,82	9,03	4,91	4200	16,55	10,72	16,20	11,47			
$f_2 = 45$ Гц						$f_2 = 50$ Гц					
f, Гц	$P_H = 0,25$ кВт	$P_H = 0,5$ кВт	$P_H = 1$ кВт	$P_H = 1,5$ кВт	$P_H = 1,6$ кВт	f, Гц	$P_H = 0,25$ кВт	$P_H = 0,5$ кВт	$P_H = 1$ кВт	$P_H = 1,5$ кВт	$P_H = 2$ кВт
Коэффициент n-ой гармоники, %						Коэффициент n-ой гармоники $k_n, \%$					
135	12,02	6,06	7,56	10,35	1,31	150	11,11	13,90	8,30	5,840	3,130
1800	20,06	13,18	12,26	13,92	11,59	1800	9,38	11,83	14,15	11,65	16,92
1890	21,67	11,28	22,77	20,57	19,76	1900	16,46	26,11	29,11	19,71	27,72
1935	11,19	2,40	16,24	4,85	17,72	2000	18,78	23,78	30,80	19,17	17,70
1980	31,47	20,28	24,00	28,06	28,06	2100	14,44	24,61	26,36	17,19	25,44
2025	27,70	17,84	25,01	23,17	25,10	2200	12,97	15,62	16,29	16,14	21,36
2070	8,09	2,09	20,07	7,68	16,95	3750	7,80	12,69	13,34	8,790	13,93
2115	16,73	7,63	20,42	14,48	19,97	3850	5,67	11,19	7,49	6,310	6,820
2160	4,84	2,25	12,03	1,85	16,65	3950	6,59	6,74	12,56	7,460	8,230
2205	19,05	14,27	14,11	12,36	15,48	4250	9,77	10,64	15,17	8,580	11,55

Окончание таблицы 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
3780	11,77	9,38	14,70	10,17	16,07	4350	3,92	5,49	4,65	5,05	6,87
3960	21,76	15,71	16,43	18,82	21,38	5700	6,85	6,06	10,38	6,18	4,35
4050	24,09	14,51	18,09	15,13	18,78	5600	4,22	5,24	7,02	5,14	4,31

4230	16,65	10,98	14,55	9,30	14,84	5800	5,32	4,47	6,82	4,29	3,31
------	-------	-------	-------	------	-------	------	------	------	------	------	------

Анализ экспериментальных результатов, приведенных выше, показывает:

1) коэффициент искажения синусоидальности напряжения на входе ПЧ при достаточной мощности источника питания не превышает допустимое по ГОСТ значение во всех режимах работы;

2) на выходе ПЧ спектр частот меняется в широких пределах в зависимости от значения частоты  $f_2$ , а коэффициент искажения намного превышает допустимые значения, с уменьшением  $f_2$  коэффициент искажения существенно возрастает.

3) зависимость коэффициента искажения от величины нагрузки при постоянстве частоты  $f_2$  выражена в меньшей степени:  $\Delta k_u < 30\%$ .

4) коэффициент искажения  $K_u$  напряжения на выходе ПЧ при учете 40 гармоник (в соответствии с ГОСТ 32144-2013) существенно отличается от  $K_u$ , рассчитанного с учетом всех выявленных гармоник (до 500-й). Для достоверного и адекватного анализа условий работы электродвигателей от ПЧ требуется рассматривать весь спектр частот напряжения на выходе ПЧ (таблица 2).

В практике использования в составе частотных приводов двигателей общепромышленных серий, как правило, не оценивается степень изменения их технических характеристик из-за нерасчетных условий эксплуатации. Прежде всего это касается снижения номинальной мощности и КПД, увеличения потерь мощности, сокращения срока службы и т. д. Обычно применяемые в частотных приводах сглаживающие дроссели существенно облегчают проблему гармоник напряжения, но не могут решить ее полностью.

Результаты проведенного эксперимента показывают, что значения коэффициента искажения синусоидальности напряжения на выходе ПЧ существенно превышают допустимую величину, рассчитанную по ГОСТ, и тем более по полному спектру гармоник. При таком качестве напряжения условия работы электродвигателей значительно ухудшаются [4]. Если для частотного привода выбирается двигатель общепромышленной серии, не рассчитанный для работы от ПЧ, следует рекомендовать проведение оценки допустимости его эксплуатации в условиях существенной несинусоидальности питающего напряжения. Номинальная мощность двигателя при его выборе должна быть завышена с учетом повышенных потерь и ухудшения условий работы изоляции. Для количественной оценки требуемой степени завышения номинальной мощности требуются дополнительные исследования в условиях действующих электроустановок на промышленных электроприводах при наличии сглаживающих дросселей.

#### Список использованных источников

1. Вольдек А. И. Электрические машины: учеб. для студентов высш. техн. учебн. заведений. - 3-е изд., перераб. Л.: Энергия, 1978. - 832 с., ил.
2. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях: в 2-х т.; пер. с франц. - М: Мир, 1983 - Т. 1. 312 с., ил.
3. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
4. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах промышленного электроснабжения промпредприятий. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 2000. 331 с., ил.