



УДК 621.398

## Особенности управления каскадными преобразователями частоты

А.Г.ВОРОНЦОВ<sup>1</sup>, В.В.ГЛУШАКОВ<sup>2</sup>, М.В.ПРОНИН<sup>1</sup>, Ю.А.СЫЧЕВ<sup>3</sup>✉

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> ПАО «Силовые машины», Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрены структуры систем с высоковольтными каскадными преобразователями частоты, содержащими многообмоточные трансформаторы и низковольтные маломощные блоки преобразования, соединенные по выходу последовательно в каждой фазе нагрузки. Низковольтные блоки содержат трехфазные диодные или активные выпрямители, конденсаторные фильтры выпрямленных напряжений, однофазные автономные инверторы напряжения и устройства отключения блоков в частичных режимах (при выходе из строя и отключении части блоков). Определены возможности работы каскадных преобразователей, даны уравнения для корректировки заданий блокам в частичных режимах, предложены таблицы корректировки заданий с оценками достижимых характеристик нагрузки. Приведены результаты экспериментов на макете мощной установки с каскадным преобразователем частоты, подтверждающие возможности обеспечения симметрии токов нагрузки при отключении части блоков и несимметрии схемы.

**Ключевые слова:** каскадный преобразователь частоты; диодный выпрямитель; активный выпрямитель; однофазный инвертор; симметрия токов; алгоритм управления; эксперимент

**Как цитировать эту статью:** Особенности управления каскадными преобразователями частоты / А.Г.Воронцов, В.В.Глушаков, М.В.Пронин, Ю.А.Сычев // Записки Горного института. 2020. Т. 241. С. 37-45. DOI: 10.31897/PMI.2020.1.37

**Введение.** Мощные полупроводниковые преобразователи частоты (ПЧ) широко применяются на предприятиях минерально-сырьевого комплекса [1, 3-5, 7, 8]. Они используются в электроприводах мельниц, приводах вентиляторов главного проветривания шахт [8], экскаваторах, самосвалах большой грузоподъемности [7], шахтных подъемниках, приводах насосов, буровых установках и т.д. В качестве примера можно отметить, что на магистральных газопроводах России используются более 700 частотно-регулируемых электроприводов с высоковольтными ПЧ мощностью от 4 до 12,5 МВт [5]. Из многих типов ПЧ наиболее востребованы каскадные преобразователи частоты (КПЧ). КПЧ поставляют многие известные фирмы – Siemens AG (преобразователи Sinamics perfect harmony GH180), Toshiba Mitsubishi-Electric (преобразователи TMdrive-MVe2), Hyundai (преобразователи N5000) и др.

Каскадные преобразователи частоты строятся при использовании низковольтных транзисторных блоков преобразования (БПЧ) с однофазным выходом. В состав КПЧ обычно входит трансформатор (Тр), который имеет трехфазную первичную обмотку и несколько вторичных обмоток. Каждый БПЧ получает питание от индивидуальной вторичной обмотки Тр. В каждой фазе нагрузки КПЧ низковольтные БПЧ соединены последовательно и образуют высоковольтный трехфазный источник питания с регулируемым напряжением и частотой. Нагрузкой КПЧ могут быть синхронные или асинхронные машины или другие устройства. КПЧ выполняют обычно на напряжения 3, 6, 10 кВ и др.

Широкое применение КПЧ обусловлено следующими преимуществами:

- небольшие искажения напряжений и токов на входе и выходе КПЧ, что позволяет применять их без дополнительных фильтров;
- возможность построения высоковольтных установок на низковольтных элементах;
- широкие возможности резервирования полупроводниковых элементов и обеспечения работоспособности систем при выходе из строя части элементов [8, 15].

В статье рассматриваются структуры КПЧ и их возможности по обеспечению заданных режимов работы при выходе из строя части полупроводниковых элементов.

**Структуры электроприводов с КПЧ** определяются заданной мощностью, напряжениями на входе и выходе, требованиями по рекуперации энергии, характером нагрузки (привода вентилятора, гребного винта, прокатного стана, подъемника), другими требованиями (КПД, надежность, живучесть, циклоустойчивость IGBT-модулей), элементной базой (напряжение и ток IGBT-модулей, диодов, конденсаторов и др.).

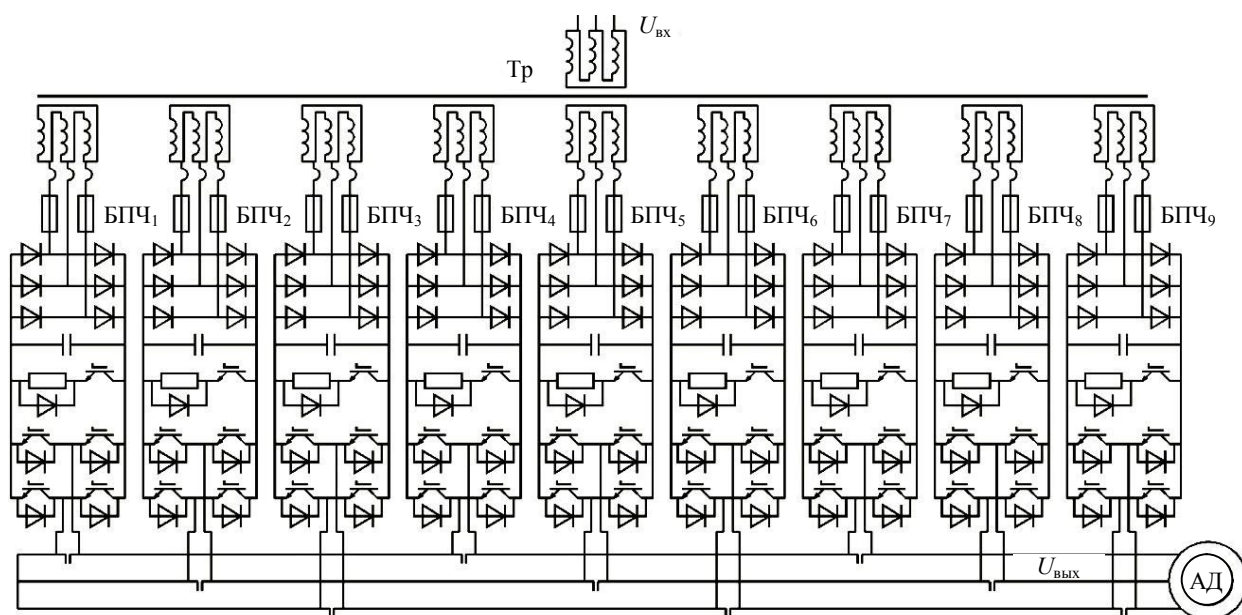


Рис.1. Схема установки КПЧ и БПЧ с диодными выпрямителями

Если рекуперация энергии двигателей через КПЧ в питающую сеть не требуется, то в низковольтных БПЧ применяются диодные выпрямители. Для уменьшения искажений токов и напряжений сети используется многообмоточный трансформатор, в котором вторичные обмотки взаимно сдвигаются по фазе. Схема привода с 10-обмоточным трансформатором и КПЧ с девятью низковольтными БПЧ с диодными выпрямителями представлена на рис.1.

В схеме (рис.1) в фазах цепи питания асинхронного двигателя (АД) последовательно соединены по три БПЧ. Взаимный сдвиг по фазе троек вторичных обмоток трансформатора выполняется на углы, кратные  $\pi/N$ , где  $N$  – число БПЧ в КПЧ. В схеме каждые три вторичные обмотки трансформатора совпадают по фазе, и эти тройки обмоток выполнены со сдвигами по фазе относительно напряжений сети на углы  $-20, 0, +20$  град., что соответствует 18-пульсной схеме выпрямления. Каждый БПЧ содержит трехфазный диодный выпрямитель, конденсаторный фильтр выпрямленного напряжения, цепь защиты от увеличения выпрямленного напряжения с чоппером и резистором, а также однофазный автономный инвертор напряжения (АИН). В составе БПЧ могут использоваться предохранители в фазах выпрямителя и коммутационный аппарат на выходе АИН. Этими элементами блок исключается из работы при его неисправности. Оставшиеся в работе БПЧ обеспечивают заданный режим работы КПЧ.

Рекуперация энергии АД в питающую сеть невозможна, так как в КПЧ используются диодные выпрямители. Однако часть энергии АД может возвращаться через АИН в цепи выпрямленного тока и расходоваться в резисторах защитных цепей. Если в приводе требуется рекуперация значительной энергии (шахтные подъемники и др.), то в БПЧ выпрямители выполняются активными, например, на модулях IGBT [2, 6-10].

**Алгоритмы управления КПЧ в нормальных режимах работы.** Алгоритмы управления многоуровневыми преобразователями частоты рассмотрены во многих публикациях [8, 13, 14]. В рассматриваемых КПЧ системы управления (СУ) АВ и АИН могут выполняться с независимым друг от друга управлением [2, 7]. В СУ однофазных АИН импульсы управления транзисторами формируются в результате сравнения напряжения управления  $u_c$  с опорными напряжениями  $u_{om}$  ( $m$  – номер БПЧ в фазе). Если в фазе нагрузки используются несколько БПЧ (например, 2, 3, 4 или 5), то и опорных напряжений несколько, как изображено на рис.2.

В нормальном режиме работы КПЧ все пилообразные напряжения имеют одинаковый размах пульсаций. При этом они смещены по уровню друг относительно друга так, что минимумы одних пил соответствуют максимумам других пил. Мгновенные значения всех пил находятся в пределах  $\pm 1$  о.е. Для управления всеми БПЧ используется одно семейство пил. В каждой фазе нагрузки импульсы управления каждого АИН закреплены за определенной пилой. Формирова-

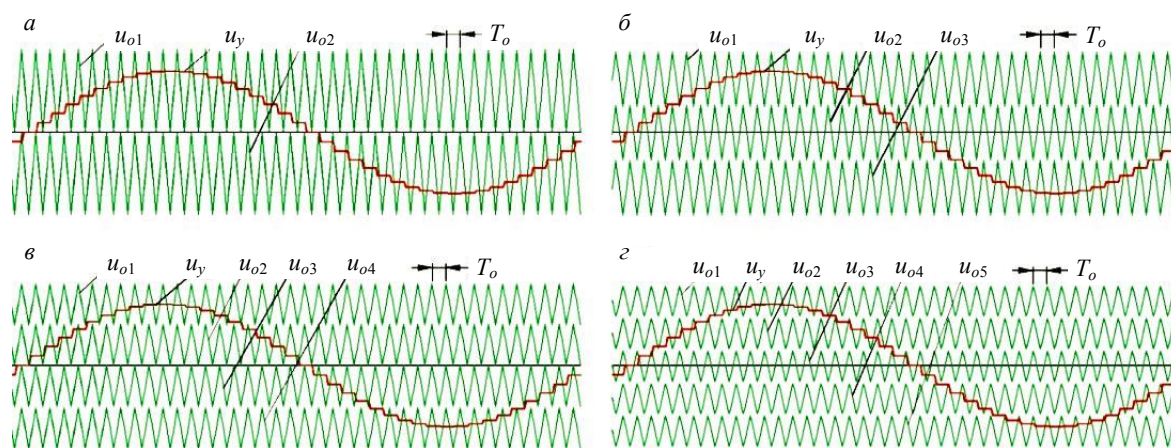


Рис.2. Напряжения опорные и управления КПЧ при двух БПЧ (а), трех (б), четырех (в), пяти (г)

ние импульсов управления транзисторами какого-либо АИН осуществляется в результате сравнения напряжения управления фазы с системой опорных напряжений данного АИН. В каждый момент времени в режиме ШИМ работает только один АИН в каждой фазе нагрузки, другие АИН данной фазы находятся в режиме перемодуляции. Возможно также, что все АИН данной фазы находятся в режиме перемодуляции.

**Особенности работы КПЧ при отключении части БПЧ.** При выходе из строя части БПЧ оставшиеся в работе блоки создают симметричную трехфазную систему напряжений нагрузки. Если в КПЧ не предусмотрены запасы по напряжению или току, то напряжение и мощность нагрузки снижаются.

Если в каждой фазе трехфазной нагрузки количество БПЧ равно  $m$ , то общее количество состояний КПЧ при работе всех БПЧ или их части определяется формулой

$$M = (m + 1)^3. \quad (1)$$

Для КПЧ с тремя БПЧ в каждой фазе нагрузки общее количество состояний КПЧ равно  $M = 64$ . Данные по состояниям КПЧ в зависимости от количества исправных БПЧ указаны в табл. 1.

Таблица 1

Взаимные сдвиги фаз и напряжения нагрузки КПЧ с девятью БПЧ в зависимости от количества исправных блоков

№ <sub>2</sub>	1	2	3	№ <sub>2</sub>	1	2	3	№ <sub>2</sub>	1	2	3	№ <sub>2</sub>	1	2	3	№ <sub>2</sub>	1	2	3	№ <sub>2</sub>	1	2	3	№ <sub>2</sub>	1	2	3	№ <sub>2</sub>	1	2	3
	$\alpha_{12}$	$\alpha_{13}$	$\alpha_{12}$		$\alpha_{13}$	$\alpha_{12}$	$\alpha_{13}$		$\alpha_{12}$	$\alpha_{13}$	$\alpha_{12}$		$\alpha_{13}$	$\alpha_{12}$	$\alpha_{13}$		$\alpha_{12}$	$\alpha_{13}$	$\alpha_{12}$		$\alpha_{13}$										
1	3	3	3	9	3	1	3	17	2	3	3	25	2	1	3	33	1	3	3	41	Переход к № 42			49	0	3	3	57	Переход к № 59		
	120	240	140		281	131	229		238	300	140		220	60	120		60	120													
	$U = 100\%$				$U = 73,6\%$				$U = 87,8\%$				$U = 51,3\%$				$U = 73,6\%$				$U = 57,7\%$										
2	3	3	2	10	3	1	2	18	2	3	2	26	2	1	2	34	1	3	2	42	1	1	2	50	0	3	2	58	0	1	2
	99	229	62		299	101	203		136	271	61		121	120	60		60	120													
	$U = 87,8\%$				$U = 51,6\%$				$U = 75,5\%$				$U = 53,9\%$				$U = 51,2\%$				$U = 33,3\%$										
3	3	3	1	11	3	1	1	19	2	3	1	27	2	1	1	35	1	3	1	43	1	1	1	51	0	3	1	59	0	1	1
	79	220	Переход к № 27			60	120		62	298	Переход к № 39			120	240		Переход к № 59				60	120									
	$U = 73,6\%$				$U = 50,9\%$				$U = 33,9\%$				$U = 57,7\%$				$U = 19,2\%$														
4	3	3	0	12	3	1	0	20	2	3	0	28	2	1	0	36	1	3	0	44	1	1	0	52	0	3	0	60	0	1	0
	60	Переход к № 44			Переход к № 24				Переход к № 44				60	Стоп			Стоп														
	$U = 57,7\%$												$U = 19,2\%$																		
5	3	2	3	13	3	0	3	21	2	2	3	29	2	0	3	37	1	2	3	45	1	0	3	53	0	2	3	61	0	0	3
	131	261	300		157	259	Переход к № 30			121	61		Переход к № 47				60	120													
	$U = 87,8\%$				$U = 57,7\%$				$U = 75,5\%$				$U = 51,2\%$				Переход к № 54														
6	3	2	2	14	3	0	2	22	2	2	2	30	2	0	2	38	1	2	2	46	1	0	2	54	0	2	2	62	0	0	2
	101	259	Переход к № 30			120	240		300	136	225		Переход к № 47				60	120													
	$U = 75,5\%$				$U = 66,7\%$				$U = 38,5\%$				$U = 53,8\%$				$U = 38,5\%$														
7	3	2	1	15	3	0	1	23	2	2	1	31	2	0	1	39	1	2	1	47	1	0	1	55	0	2	1	63	0	0	1
	61	298	Переход к № 47			89	224		Переход к № 47				60	120	300		Переход к № 59														
	$U = 51,6\%$				$U = 53,9\%$				$U = 33,3\%$				$U = 19,2\%$																		
8	3	2	0	16	3	0	0	24	2	2	0	32	2	0	0	40	1	2	0	48	1	0	0	56	0	2	0	64	0	0	0
	Переход к № 24				Стоп				60	Стоп			Переход к № 44				Стоп				Стоп										
					$U = 38,5\%$																										



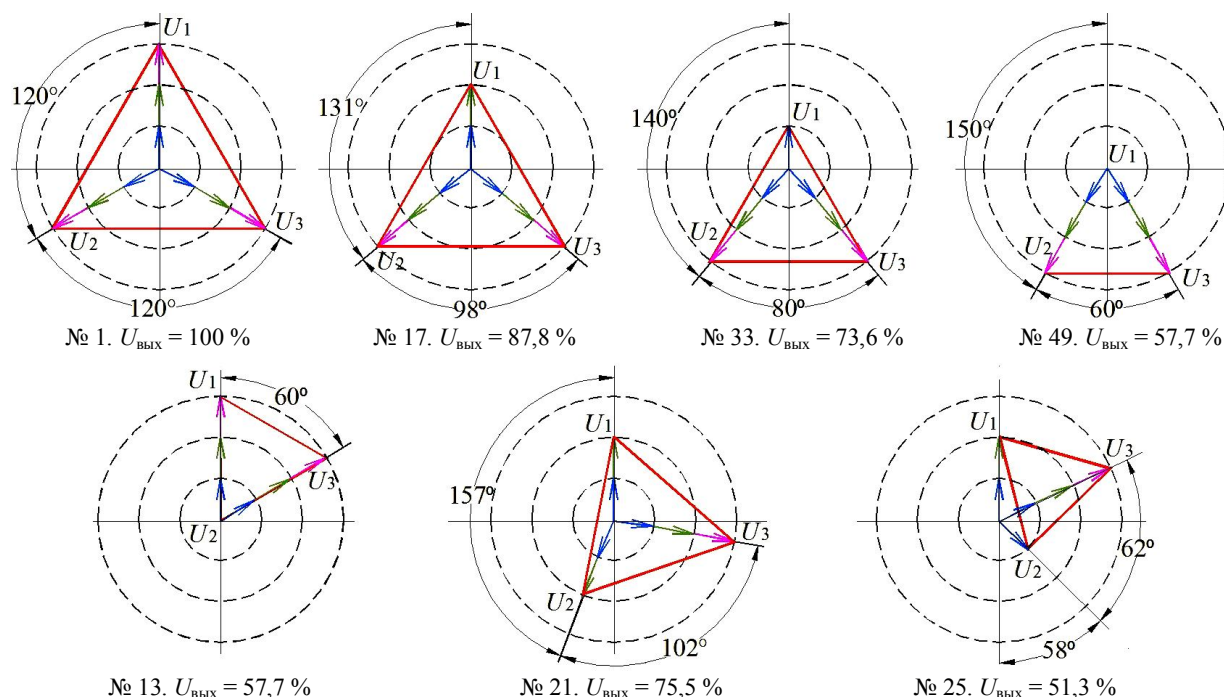


Рис.3. Формирование трехфазной симметричной системы напряжений на выходе КПЧ с девятью БПЧ при выходе из строя части БПЧ

В верхней строке таблицы указаны номера фаз. Во второй сверху строке указаны обозначения углов сдвига векторов напряжений 2-й и 3-й фаз КПЧ относительно 1-й фазы ( $\alpha_{12}$  и  $\alpha_{13}$ ). В столбцах с заголовками «№» указаны номера состояний КПЧ. В других строках табл.1 указано количество исправных БПЧ в каждой фазе нагрузки, а также те сдвиги по фазе векторов напряжений (в градусах) относительно вектора 1-й фазы, при которых обеспечивается симметрия трехфазной системы напряжений нагрузки при максимальном использовании работающих БПЧ. Указаны также наибольшие симметричные напряжения нагрузки, которые обеспечиваются исправными БПЧ. Рабочие состояния КПЧ показаны на светлом фоне, на сером фоне показаны состояния, из которых следует переходить к рабочим состояниям (например, от состояния № 12 к состоянию № 33), на темном фоне – выключение установки (Стоп).

Для КПЧ с девятью БПЧ некоторые состояния системы отображены на рис.3 в виде диаграмм напряжений фаз при формировании трехфазной симметричной системы напряжений нагрузки (в зависимости от количества исправных БПЧ).

Если КПЧ содержит 15 БПЧ (по 5 в фазах нагрузки), то состояния системы в зависимости от количества исправных БПЧ в фазах представлены в табл.2. Состояния системы пронумерованы, указаны допустимые для работы (на светлом фоне).

На рис.4 под № 1 представлена векторная диаграмма напряжений фаз при работе всех БПЧ. Углы взаимного сдвига векторов 120 эл. град. Вектор напряжения фазы нагрузки образуется как сумма векторов напряжений работающих АИН. Линии соединения концов векторов напряжений фаз образуют симметричную трехфазную систему напряжений нагрузки (100 %).

На рис.4 под № 37 представлена диаграмма напряжений при отключении одного БПЧ в 1-й фазе нагрузки. Создание симметричной системы линейных напряжений нагрузки обеспечивается путем изменения фаз 2-го и 3-го векторов напряжений (угол взаимного сдвига 2-го и 3-го векторов указан на рис.4 – 107 эл. град.). При этом действующее значение симметричной системы линейных напряжений нагрузки уменьшается приблизительно до 93 %.

При отключении трех БПЧ в 1-й фазе и двух БПЧ во 2-й фазе (№ 121) КПЧ может сформировать симметричную систему напряжений нагрузки с действующим значением до 53,6 %.

Таблица 2

Состояния КПЧ с 15 БПЧ в зависимости от исправности блоков

№	1	2	3	№	1	2	3	№	1	2	3	№	1	2	3	№	1	2	3	№	1	2	3	№	1	2	3	№	1	2	3	№	1	2	3
1	5	5	5	25	5	1	5	49	4	3	5	73	3	5	5	97	3	1	5	121	2	3	5	145	1	5	5	169	1	1	5	193	0	3	5
2	5	5	4	26	5	1	4	50	4	3	4	74	3	5	4	98	3	1	4	122	2	3	4	146	1	5	4	170	1	1	4	194	0	3	4
3	5	5	3	27	5	1	3	51	4	3	3	75	3	5	3	99	3	1	3	123	2	3	3	147	1	5	3	171	1	1	3	195	0	3	3
4	5	5	2	28	5	1	2	52	4	3	2	76	3	5	2	100	3	1	2	124	2	3	2	148	1	5	2	172	1	1	2	196	0	3	2
5	5	5	1	29	5	1	1	53	4	3	1	77	3	5	1	101	3	1	1	125	2	3	1	149	1	5	1	173	1	1	1	197	0	3	1
6	5	5	0	30	5	1	0	54	4	3	0	78	3	5	0	102	3	1	0	126	2	3	0	150	1	5	0	174	1	1	0	198	0	3	0
7	5	4	5	31	5	0	5	55	4	2	5	79	3	4	5	103	3	0	5	127	2	2	5	151	1	4	5	175	1	0	5	199	0	2	5
8	5	4	4	32	5	0	4	56	4	2	4	80	3	4	4	104	3	0	4	128	2	2	4	152	1	4	4	176	1	0	4	200	0	2	4
9	5	4	3	33	5	0	3	57	4	2	3	81	3	4	3	105	3	0	3	129	2	2	3	153	1	4	3	177	1	0	3	201	0	2	3
10	5	4	2	34	5	0	2	58	4	2	2	82	3	4	2	106	3	0	2	130	2	2	2	154	1	4	2	178	1	0	2	202	0	2	2
11	5	4	1	35	5	0	1	59	4	2	1	83	3	4	1	107	3	0	1	131	2	2	1	155	1	4	1	179	1	0	1	203	0	2	1
12	5	4	0	36	5	0	0	60	4	2	0	84	3	4	0	108	3	0	0	132	2	2	0	156	1	4	0	180	1	0	0	204	0	2	0
13	5	3	5	37	4	5	5	61	4	1	5	85	3	3	5	109	2	5	5	133	2	1	5	157	1	3	5	181	0	5	5	205	0	1	5
14	5	3	4	38	4	5	4	62	4	1	4	86	3	3	4	110	2	5	4	134	2	1	4	158	1	3	4	182	0	5	4	206	0	1	4
15	5	3	3	39	4	5	3	63	4	1	3	87	3	3	3	111	2	5	3	135	2	1	3	159	1	3	3	183	0	5	3	207	0	1	3
16	5	3	2	40	4	5	2	64	4	1	2	88	3	3	2	112	2	5	2	136	2	1	2	160	1	3	2	184	0	5	2	208	0	1	2
17	5	3	1	41	4	5	1	65	4	1	1	89	3	3	1	113	2	5	1	137	2	1	1	161	1	3	1	185	0	5	1	209	0	1	1
18	5	3	0	42	4	5	0	66	4	1	0	90	3	3	0	114	2	5	0	138	2	1	0	162	1	3	0	186	0	5	0	210	0	1	0
19	5	2	5	43	4	4	5	67	4	0	5	91	3	2	5	115	2	4	5	139	2	0	5	163	1	2	5	187	0	4	5	211	0	0	5
20	5	2	4	44	4	4	4	68	4	0	4	92	3	2	4	116	2	4	4	140	2	0	4	164	1	2	4	188	0	4	4	212	0	0	4
21	5	2	3	45	4	4	3	69	4	0	3	93	3	2	3	117	2	4	3	141	2	0	3	165	1	2	3	189	0	4	3	213	0	0	3
22	5	2	2	46	4	4	2	70	4	0	2	94	3	2	2	118	2	4	2	142	2	0	2	166	1	2	2	190	0	4	2	214	0	0	2
23	5	2	1	47	4	4	1	71	4	0	1	95	3	2	1	119	2	4	1	143	2	0	1	167	1	2	1	191	0	4	1	215	0	0	1
24	5	2	0	48	4	4	0	72	4	0	0	96	3	2	0	120	2	4	0	144	2	0	0	168	1	2	0	192	0	4	0	216	0	0	0

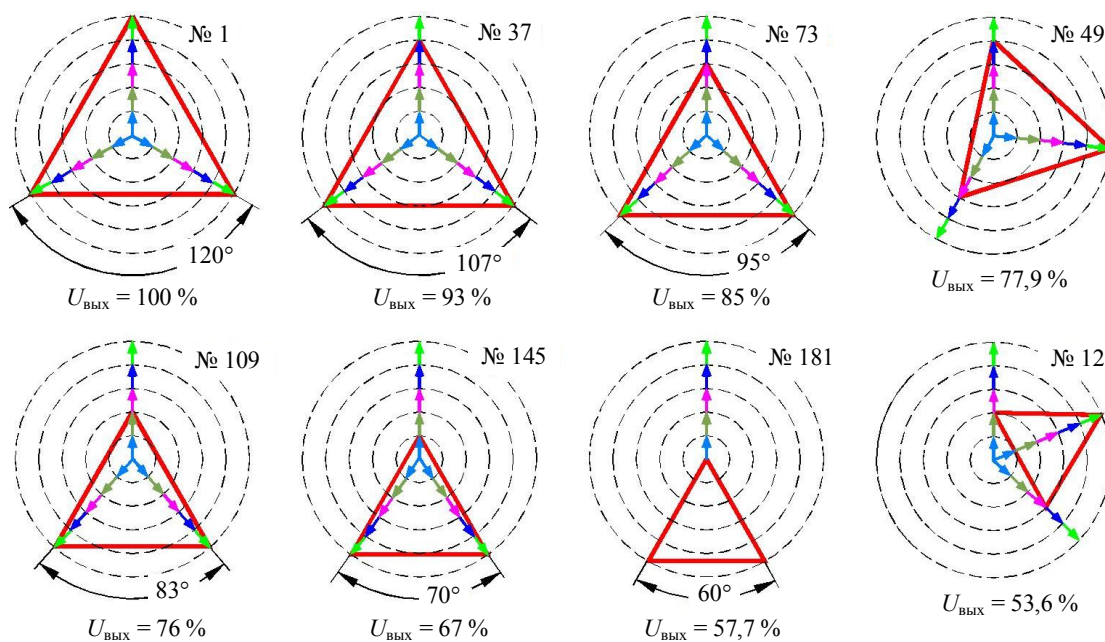


Рис.4. Формирование трехфазной симметричной системы напряжений на выходе КПЧ с 15 БПЧ при выходе из строя части БПЧ

**Изменения алгоритма управления КПЧ при отключении части БПЧ.** Если КПЧ содержит в каждой фазе пять БПЧ и все блоки работают, то в каждой фазе нагрузки для формирования импульсов управления транзисторами используется полная система пилообразных напряжений. Количество пил равно пяти, как указано на рис.2, г. При отключении одного БПЧ в 1-й фазе нагрузки в этой фазе для формирования импульсов управления оставшихся в работе АИН используются системы опорных напряжений с четырьмя пилами, как указано на рис.2, в, в других фазах

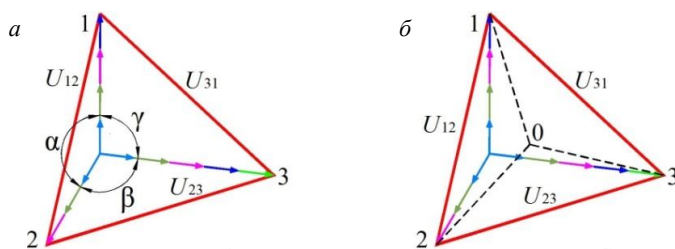


Рис.5. Диаграммы фазных и линейных напряжений для состояния КПЧ № 49

используются по пять опорных напряжений. Если в 1-й фазе нагрузки в работе остаются три БПЧ, то количество опорных напряжений в АИН этой фазы уменьшается до трех, как указано на рис.2, б.

При неравном количестве работающих БПЧ в фазах изменяются углы, на которые взаимно сдвинуты вектора напряжений фаз при формировании симметричной системы линейных напряжений. Эти углы сдвига определяются при использовании

диаграммы (рис.5, а). При этом изменяются напряжения фаз нагрузки и положение точки 0 (рис.5, б).

Уравнения для симметричной трехфазной системы линейных напряжений нагрузки:

$$|U_{12}| = |U_{23}|, \quad |U_{12}| = |U_{31}|, \quad (2)$$

где  $U_{12}$ ,  $U_{23}$ ,  $U_{31}$  – действующие линейные напряжения.

Уравнения (2) могут быть записаны с использованием напряжений фаз  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$  и углов между ними  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  (напряжения фаз пропорциональны количеству работающих БПЧ):

$$\left. \begin{aligned} U_1^2 + U_2^2 - 2U_1U_2 \cos \alpha &= U_2^2 + U_3^2 - 2U_2U_3 \cos \beta; \\ U_1^2 + U_2^2 - 2U_1U_2 \cos \alpha &= U_3^2 + U_1^2 - 2U_3U_1 \cos \gamma; \\ \alpha + \beta + \gamma &= 2\pi. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Система уравнений (3) может решаться относительно неизвестных углов  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  итерационными методами, например, при следующей записи уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{n+1} &= (\alpha_n + Z\alpha_n + U_3^2 - 2U_2U_3 \cos \beta_n - U_1^2 + 2U_1U_2 \cos \alpha_n) / (1 + Z); \\ \beta_{n+1} &= (\beta_n + Z\beta_n + U_3^2 - 2U_3U_1 \cos \gamma_n - U_2^2 + 2U_1U_2 \cos \alpha_n) / (1 + Z); \\ \gamma_{n+1} &= 2\pi - \alpha_{n+1} - \beta_{n+1}, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где  $n$  – номер итерации;  $Z$  – параметр, обеспечивающий устойчивость процесса вычислений.

Не во всех состояниях КПЧ можно определить углы  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$ . Например, при неисправности всех БПЧ в двух фазах нагрузки в соответствии с табл.1 невозможны состояния системы № 16, 32, 48, 52, 56, 60, 61, 62, 63, 64.

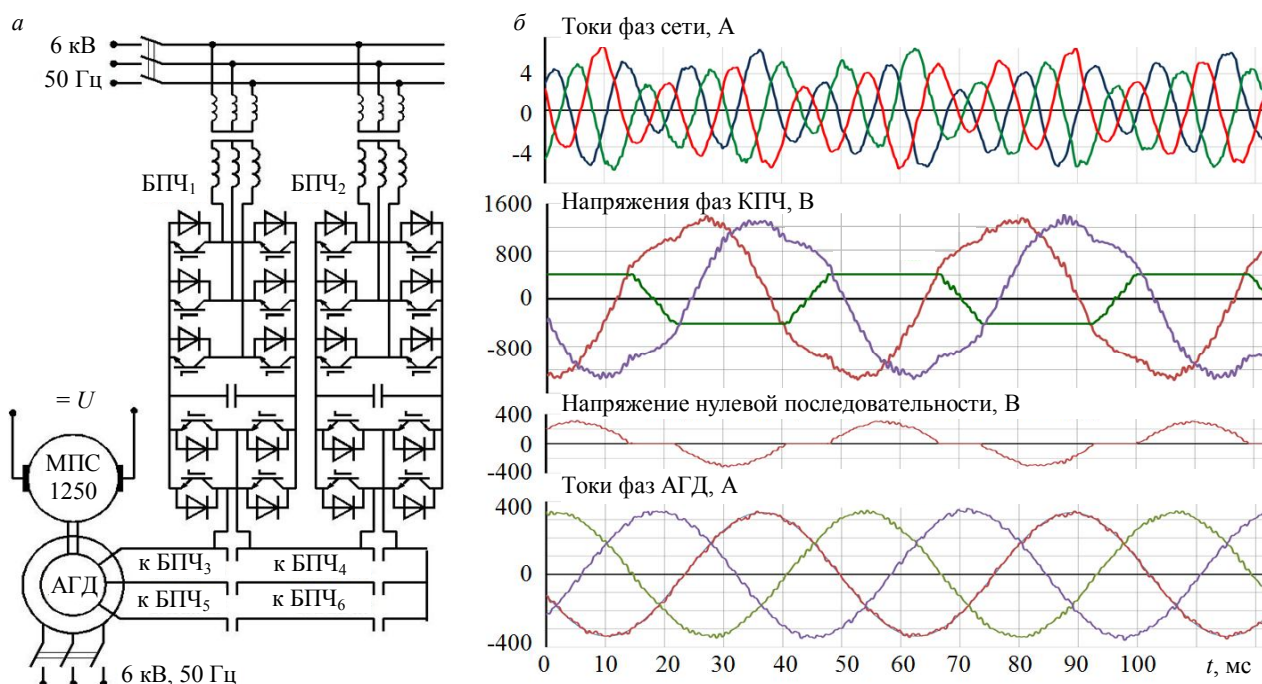
В результате решения уравнений (4) по известным фазам  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  и напряжениям КПЧ  $U_1$  и  $U_2$  определяются наибольшие напряжения нагрузки с нулевой точкой 0 (рис.5, б):

$$U_{\text{л}} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 - 2U_1U_2 \cos \alpha}; \quad U_{\text{ф}} = U_{\text{л}} / \sqrt{3}. \quad (5)$$

Напряжения, определенные выражениями (5), следует рассматривать как ограничения напряжений на выходе КПЧ, которые действуют в системе управления. Фактические напряжения могут быть меньше и определяются системой регулирования. Задача итерационного расчета фаз и напряжений по формулам (4) и (5) решена в Excel.

**Согласование характеристик КПЧ и нагрузки в частичных режимах.** Если нагрузкой КПЧ является синхронный двигатель, а в КПЧ не предусмотрен запас по напряжению на выходе, то при отключении части БПЧ напряжение двигателя должно быть уменьшено, например, путем уменьшения магнитного потока двигателя. При сохранении мощности нагрузки это приводит к увеличению токов на выходе КПЧ, т.е. в оборудовании должен быть предусмотрен запас по току.

Другое решение заключается в том, что в КПЧ предусматривается запас по напряжению. Например, в КПЧ с активными выпрямителями при отключении части БПЧ повышаются выпрямленные напряжения и за счет этого поддерживаются выходные напряжения.

Рис.6. Схема макета с КПЧ, напряжения и токи КПЧ при отключении одного БПЧ<sub>6</sub>

**Экспериментальные исследования.** Экспериментальная проверка рассмотренных технических решений выполнена в ПАО «Силовые машины» на макете установки, содержащей асинхронизированный генератор-двигатель (АГД) с трехфазным ротором и активный КПЧ, который подключен к ротору через контактные кольца. Статор АГД подключен к электросети 6 кВ, 50 Гц. К этой же электросети подключены через трансформаторы входы КПЧ. Упрощенная схема макета представлена на рис.6, а. АГД имеет мощность 2530 кВА. Скольжение регулируется в пределах  $\pm 40\%$ . В КПЧ в каждой фазе нагрузки последовательно включены два БПЧ. Частота ШИМ КПЧ 4 кГц. Установка снабжена системой векторного управления, которая поддерживает заданный режим работы установки, создавая в роторе АГД трехфазную симметричную систему токов.

Одна из задач исследований – оценка возможностей КПЧ и системы управления по созданию симметричной системы токов в роторе АГД в различных режимах при отключении части БПЧ. На рис.6, б представлена диаграмма токов и напряжений установки при отключении БПЧ<sub>6</sub> в третьей фазе. В этом режиме скольжение АГД равно 40 %. Мгновенные значения переменных показаны на рис.6, б. В данном случае использован следующий вариант управления. При увеличении напряжения ротора БПЧ<sub>5</sub> не может создать требуемое напряжение фазы, так как БПЧ<sub>6</sub> отключен и БПЧ<sub>5</sub> переходит в режим перемодуляции – его напряжение управления превышает 1 о.е. В системе регулирования часть напряжения управления БПЧ<sub>5</sub>, превышающая 1 о.е., запоминается как составляющая нулевой последовательности, которая вычитается из напряжений управления всех фаз. Полученные напряжения используются как модифицированные напряжения управления. Соответственно форме модифицированных напряжений изменяется форма силовых напряжений фаз на выходе КПЧ – теряется симметрия силовых напряжений, но обеспечивается симметрия токов ротора, что видно из рис.6, б). В частности, напряжения 1-й и 2-й фаз взаимно сдвинуты менее, чем на 90 эл. град. (вместо 120 эл. град. в симметричных режимах).

Необходимо отметить, что в несимметричном режиме работы КПЧ искажаются токи фаз питающей сети. Следует ожидать, что при большем количестве БПЧ в составе КПЧ отключение одного блока приведет к меньшим искажениям токов сети.





**Выводы.** Каскадные преобразователи частоты позволяют создавать высоковольтные системы при использовании низковольтных силовых блоков. Они имеют малые искажения токов и напряжений на входе и выходе, обеспечивают гальваническую развязку электросетей и нагрузок, обладают высокой живучестью, позволяют регулировать частоты вращения двигателей в полном диапазоне. Благодаря указанным преимуществам каскадные преобразователи широко применяются в приводах компрессоров газопроводов, вентиляторов шахт, насосов, в шахтных подъемниках, во многих других установках.

Для внедрения эффективных алгоритмов управления и повышения надежности и живучести приводов с каскадными преобразователями частоты выполнен анализ режимов работы и характеристик преобразователей в частичных режимах (при выходе из строя и отключении различного количества силовых блоков). Выявлено, что для формирования симметричной системы токов нагрузки необходима корректировка заданий по взаимному сдвигу векторов напряжений фаз в зависимости от числа работающих блоков. Предложены таблицы состояний преобразователей, определяющие задания по фазам напряжений, характеризующие возможности создания симметричной трехфазной системы напряжений нагрузки в частичных режимах. Математически определен алгоритм расчета уставок по фазам напряжений.

На макетной установке с асинхронизированным генератором-двигателем мощностью 2530 кВА и активным каскадным преобразователем частоты соизмеримой мощности выполнены эксперименты, подтверждающие эффективность рассмотренных технических решений. В системе управления преобразователя использован сравнительно простой алгоритм корректировки фаз напряжений на выходе в частичных режимах, основанный на преобразовании части напряжения управления, выходящей за пределы опорного напряжения, в составляющую нулевой последовательности и в вычитании этой составляющей из всех фазных напряжений управления. Реализация этого алгоритма позволила обеспечить практически синусоидальную форму токов фаз при частоте ШИМ преобразователя 4000 Гц.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Егоров А.Н. Практический опыт применения преобразователей частоты POWER FLEX 7000 в горнодобывающей промышленности / А.Н.Егоров, А.С.Семенов, О.В.Федоров // Труды НГТУ им. Р.Е.Алексеева. 2017. № 4 (119). С. 86-93.
2. Ефимов А.А. Активные преобразователи в регулируемых электроприводах переменного тока. Новоуральск: Изд-во НГТИ, 2001. 250 с.
3. Козярук А.Е. Энергоэффективные электромеханические комплексы горно-добывающих и транспортных машин // Записки Горного института. 2016. Т.218. С. 261-269.
4. Крюков О.В. Автоматизированный электропривод турбокомпрессоров с высоковольтными многоуровневыми преобразователями частоты // Автоматизация и ИТ в энергетике. 2019. № 5 (118). С. 5-9.
5. Крюков О.В. Анализ структур преобразователей частоты для технологически связанных электроприводных газоперекачивающих агрегатов // Электротехнические системы и комплексы. 2015. № 2 (27). С. 11-14.
6. Пронин М.В. Силовые полностью управляемые полупроводниковые преобразователи (моделирование и расчет) / М.В.Пронин, А.Г.Воронцов. СПб: Электросила, 2003. 172 с.
7. Пронин М.В. Управление многотактным активным выпрямителем экскаватора ЭКГ-35К / М.В.Пронин, А.Г.Воронцов, В.В.Терещенков // Горное оборудование и электромеханика. 2009. № 10. С. 29-33.
8. Пронин М.В. Электромеханотронные комплексы и их моделирование по взаимосвязанным подсистемам / М.В.Пронин, А.Г.Воронцов. СПб: Ладога, 2017. 220 с.
9. Шрейнер Р.Т. Построение высоковольтных рекуперирующих каскадных непосредственных преобразователей частоты для электропривода / Р.Т.Шрейнер, А.И.Калыгин, В.К.Кривовяз // Электротехника. 2012. № 9. С. 8-13.
10. Электроприводы и системы с электрическими машинами и полупроводниковыми преобразователями (моделирование, расчет, применение) / М.В.Пронин, А.Г.Воронцов, П.Н.Калачиков, А.П.Емельянов. СПб: Силовые машины. Электросила. 2004. 252 с.
11. Boonmee C. Control of single-phase cascaded H-bridge multilevel inverter with modified MPPT for grid-connected photovoltaic systems / C.Boonmee, Y.Kumsuwan // IECON 2013. 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IEEE. Vienna. Austria. 2013. № 14016134.
12. Carnielutti F. New modulation strategy for asymmetrical cascaded multilevel converters under fault conditions / F.Carnielutti, H.Pinheiro // IECON 2013. 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IEEE. Vienna. Austria. 2013. № 14016058.
13. Ghoreishy H. A new selective harmonic elimination pulse-width and amplitude modulation (SHE-PWAM) for drive applications / H.Ghoreishy, A.V.Yazdian // IECON 2013. 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IEEE. Vienna. Austria. 2013. № 14016018.





14. *Rodríguez J.* Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications / J.Rodríguez, J.-S.Lai, F.Z.Peng // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2002. Vol. 49. Iss. 4. P. 724-738.
15. Operation of a medium-voltage drive under faulty conditions / J.Rodríguez, J.Pontt, R.Musalem, P.Hammond // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2005. Vol. 52. Iss. 4. P. 1080-1085.

**Авторы:** **А.Г.Воронцов**, канд. техн. наук, ассистент, [ag.vorontsov@npcses.ru](mailto:ag.vorontsov@npcses.ru) (Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия), **В.В.Глушаков**, инженер, [glushvas@yandex.ru](mailto:glushvas@yandex.ru) (ПАО «Силовые машины», Санкт-Петербург, Россия), **М.В.Пронин**, д-р техн. наук, профессор, [mpronin1@rambler.ru](mailto:mpronin1@rambler.ru) (Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия), **Ю.А.Сычев**, канд. техн. наук, доцент, [Sychev\\_YuA@pers.spmi.ru](mailto:Sychev_YuA@pers.spmi.ru) (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия).

Статья поступила в редакцию 31.03.2019.

Статья принята к публикации 03.07.2019.