

# Энергосберегающие преобразователи частоты

## для асинхронных и синхронных электродвигателей

**Компании «РУСЭЛТ» (Россия) и SYNTRONIC (Германия) совместно разработали на базе IGBT-технологии энергосберегающие преобразователи частоты для асинхронных и синхронных электродвигателей. Устройства серии SYN-OX имеют ряд привлекательных особенностей.**

**Юрий Карпиленко**

ko@ruselt.ru

**Алексей Кошарный**

m3@ruselt.ru

В рамках совместных воплощенных инженерных решений группы компаний «Русэлт» и компании SYNTRONIC освоен выпуск энергосберегающих высоковольтных преобразователей частоты серии Syn-OX. Данная серия пришла на смену ранее изготавливаемым и поставляемым высоковольтных преобразователей частоты серии РИТМ-В, зарекомендовавшей себя в надежной эксплуатации как на возводимых, так и на функционирующих крупных объектах различных отраслей с 2003 г.

Энергосберегающие высоковольтные преобразователи частоты (ПЧ) предназначены для работы с синхронными или асинхронными электродвигателями. Плавный пуск установки, определенные ее настройки и возможность регулирования вращательной частоты позволяют повысить эффективность электродвигателя и сократить расход электроэнергии до 30%. При номинальных частоте и напряже-

нии коэффициент несинусоидальности остается небольшим и обычно не превышает 1%, а регулируя частоту можно сохранить синусоидальную форму напряжения. Благодаря системам управления высоковольтными ПЧ, не происходит замыканий, не перегружаются важные элементы установки, режим работы проходит полную фазу без перенапряжений или перегрева.

Если говорить о конструктивных особенностях высоковольтных ПЧ, то они представляют собой сборочные единицы, интегрированные в шкафы и выполняющие определенные функции. Для удобства конструкция шкафов разработана с учетом возможности доступа обслуживающего персонала с двух сторон.

По сравнению с другими решениями, высоковольтные ПЧ имеют ряд важных преимуществ:

- Прямое подключение установки к сети можно осуществить, применив трансформатор специаль-

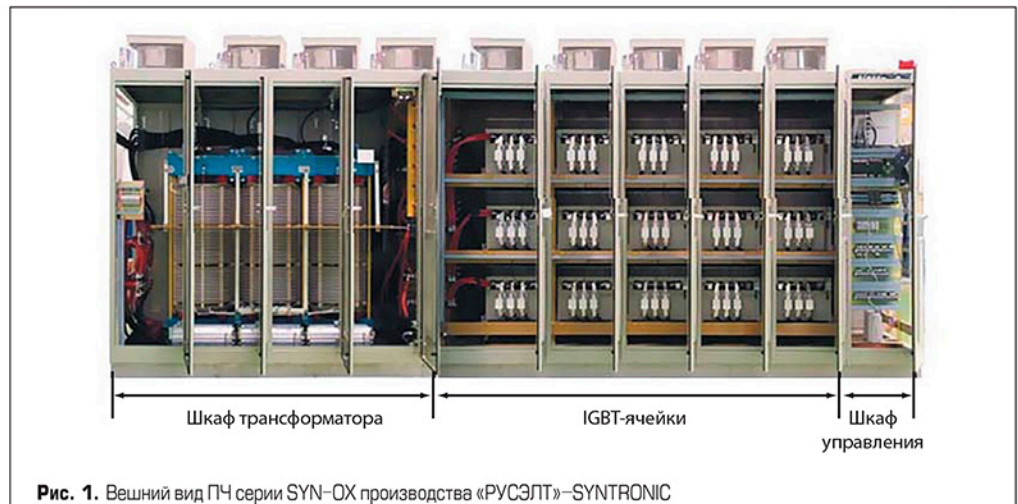


Рис. 1. Внешний вид ПЧ серии SYN-OX производства «РУСЭЛТ»–SYNTRONIC

ной конструкции (имеющий расщепленные вторичные обмотки).

- Приобретать выходной трансформатор не требуется, так как высокое напряжение получают за счет сложения напряжения в инверторных ячейках.
- О каком бы диапазоне частоты ни шла речь, высоковольтные ПЧ демонстрируют максимально высокий коэффициент мощности.
- Мощное ШИМ-управление гарантирует высокую динамику электропривода. КПД последнего не зависит от выходной частоты.

При кратковременном прекращении подачи электричества остановки устройства не происходит. Также допускается небольшое снижение питающего напряжения без вынужденного прекращения работы установки. Если из строя выходят инверторные силовые модули, то ячейки шунтируются.

Для подключения ПЧ с электродвигателем может быть использован кабель практически любой длины. Нет необходимости устанавливать специальные фильтры или бетонные реакторы для повышения входной мощности установки. Управление ПЧ осуществляется с диспетчерского пульта при помощи специального программного обеспечения или напрямую.

**ПЧ серии SYN-OX**

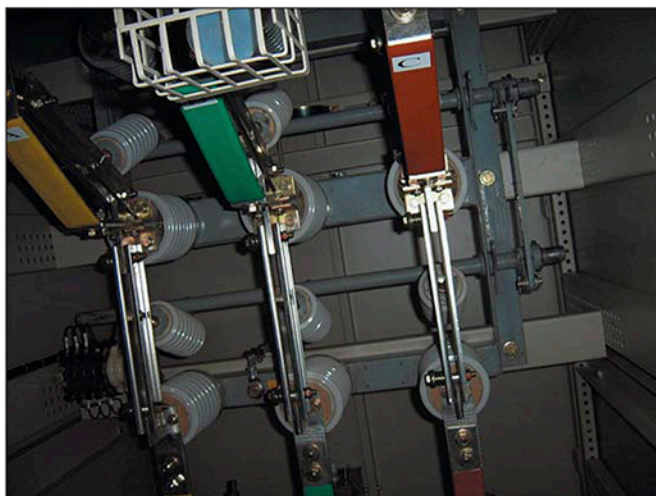
ПЧ серии SYN-OX номинальной мощностью 200–9400 кВт на напряжения 10, 6, 3 кВ (рис. 1, табл. 1 и 2) включают в себя байпасную систему управления, встроенный многообмоточный трансформатор; 48-импульсный инвертор среднего напряжения имеет синусоидальный выход с регулированием скорости и 150%-ным пусковым моментом. Для ПЧ рассматриваемой серии не требуется дополнительный выходной синус-фильтр.

В систему ПЧ среднего напряжения серии SYN-OX входят:

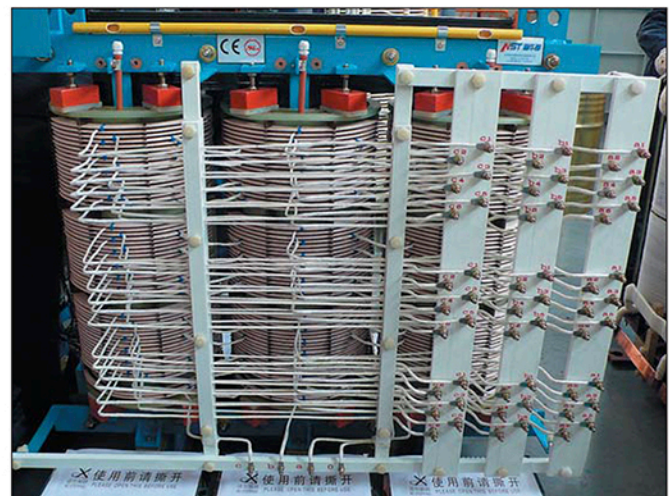
- шкаф байпаса (рис. 2);
- трехфазный многообмоточный фазосдвигающий трансформатор (рис. 3);

**Таблица 1.** Основные технические характеристики преобразователей частоты серии SYN-OX

Параметр		Значение
Номинальная мощность, кВт		200–9400
Полная мощность, кВА		250–11750
Входное напряжение, В		10000/6000/3000 ±10/15%
Входная частота, Гц		50±10%
Тип электродвигателя		асинхронный, синхронный
Количество силовых ячеек на каждую фазу	10 кВ	8/24
	6 кВ	5/15
	3 кВ	3/9
Входной коэффициент мощности (cosφ), %		>97
КПД, %		>96–98
Диапазон регулирования выходной частоты, Гц		0–120 (с плавным регулированием) ±0,1
Точность выходной частоты, Гц		±0,1
Время реакции системы на внешние воздействия (время реагирования), мс		1
Пульсность выпрямителя		24/48
Пульсации момента, %		0,5
Выходное напряжение, В		0–10000 ±10% 0–6000 ±10% 0–3000 ±10%
Перегрузочная способность		120% номинального тока в течение 60 с и 150% в течение 3 с
Интерфейс системы управления		сенсорная, ЖК-монитор 12", клавиатура (RUS/ENG), отображение состояния и управление работой ПЧ
Время разгона/торможения		0,1–3600 с по выбору
Характеристика управления		скалярное/векторное (несколько кривых разгона и управления ЭД)
Метод изоляции высокого/низкого напряжения		оптоволоконные кабели
Интерфейс связи		физический порт RS-485, протокол ModBus RTU
Дискретные	входы	16 цифровых
	выходы	8 релейных
Аналоговые	входы	A11, A12: 0–10 В/0–20мА; A13: –10–10 В
	выходы	AO1, AO2: 0–10 В; AO3, AO4: 0–10 В/0–20 мА
Степень защиты		шкаф инвертора – IP30, вентиляторы – IP21, другие устройства – по требованию
Производитель IGBT-модулей		Infineon (Германия)
Класс изоляции трансформатора		Н
Способ охлаждения шкафов		принудительное, воздушное
Температура окружающей среды, °С	минимальная	0
	максимальная	+40
Влажность, %		95, без конденсата
Вибрация		5,9 м/с <sup>2</sup> ниже 0,5 г
Поток входящего воздуха, м <sup>3</sup> /ч		по спецификации



**Рис. 2.** Байпасный шкаф



**Рис. 3.** Трансформатор трехфазный многообмоточный фазосдвигающий



Таблица 2. Модельный ряд и габариты ПЧ серии SYN-OX

Тип ПЧ	Мощность ПЧ и ЭД, кВт	Полная мощность ПЧ, кВА	Ном. ток ПЧ, А	Размеры, (Д×Ш×В), мм	Вес, кг	
<b>на 3 кВ (9 силовых ячеек)</b>						
SYN-OX-AV-03-0200-052BSF-IP30	200	250	49	3780×1200×2555	3250	
SYN-OX-AV-03-0250-052BSF-IP30	250	315	63			
SYN-OX-AV-03-0315-052BSF-IP30	315	400	79			
SYN-OX-AV-03-0400-052BSF-IP30	400	500	101			
SYN-OX-AV-03-0500-052BSF-IP30	500	630	125			
SYN-OX-AV-03-0630-032BSF-IP30	630	800	156			
SYN-OX-AV-03-0800-052BSF-IP30	800	1000	198			
SYN-OX-AV-03-1000-052BSF-IP30	1000	1250	248			
SYN-OX-AV-03-1250-052BSF-IP30	1250	1600	312			
SYN-OX-AV-03-1600-052BSF-IP30	1600	2000	400	4300×1200×2555	3600 4400	
<b>на 6 кВ (15 силовых ячеек)</b>						
SYN-OX-AV-06-0250-052BSF-IP30	250	315	31	4300×1200×2555	2850	
SYN-OX-AV-06-0315-052BSF-IP30	315	400	40		2950	
SYN-OX-AV-06-0400-052BSF-IP30	400	500	48		3150	
SYN-OX-AV-06-0500-052BSF-IP30	500	630	61		3500	
SYN-OX-AV-06-0630-052BSF-IP30	630	800	77		3600	
SYN-OX-AV-06-0800-052BSF-IP30	800	1000	98		3850	
SYN-OX-AV-06-1000-052BSF-IP30	1000	1250	123		4200	
SYN-OX-AV-06-1250-052BSF-IP30	1250	1600	154		4850	
SYN-OX-AV-06-1600-052BSF-IP30	1600	2000	192		5300	
SYN-OX-AV-06-2000-052BSF-IP30	2000	2500	243	5850×1300×2555	5850	
SYN-OX-AV-06-2500-052BSF-IP30	2500	3150	304		6250×1400×2555	9000
SYN-OX-AV-06-3150-052BSF-IP30	3150	4000	400			10550
SYN-OX-AV-06-4000-052BSF-IP30	4000	5000	500	по запросу		
SYN-OX-AV-06-5000-052BSF-IP30	5000	6250	608			
SYN-OX-AV-06-5600-052BSF-IP30	5600	7000	680			
SYN-OX-AV-06-6250-052BSF-IP30	6250	7800	760			
<b>на 10 кВ (24 силовых ячейки)</b>						
SYN-OX-AV-10-0400-052BSF-IP30	400	500	31	5200×1200×2555	3500	
SYN-OX-AV-10-0500-052BSF-IP30	500	630	40		3800	
SYN-OX-AV-10-0630-052BSF-IP30	630	800	48		4000	
SYN-OX-AV-10-0800-052BSF-IP30	800	1000	61		5850×1300×2555	5000
SYN-OX-AV-10-1000-052BSF-IP30	1000	1250	77	5500		
SYN-OX-AV-10-1250-052BSF-IP30	1250	1600	96	5800		
SYN-OX-AV-10-1600-052BSF-IP30	1600	2000	115	6000		
SYN-OX-AV-10-2000-052BSF-IP30	2000	2500	154	6250×1400×2555	6500	
SYN-OX-AV-10-2500-052BSF-IP30	2500	3150	192		9500	
SYN-OX-AV-10-3150-052BSF-IP30	3150	4000	243		11550	
SYN-OX-AV-10-4000-052BSF-IP30	4000	5000	304		по запросу	
SYN-OX-AV-10-5000-052BSF-IP30	5000	5600	385			
SYN-OX-AV-10-5600-052BSF-IP30	5600	6250	432			
SYN-OX-AV-10-6250-052BSF-IP30	6250	7500	482			
SYN-OX-AV-10-7500-052BSF-IP30	7500	9400	578			
SYN-OX-AV-10-9400-052BSF-IP30	9400	11750	725			

- шкаф инвертора (преобразователя) с силовыми ячейками (рис. 4);
  - шкаф контроллера управления (рис. 5).
- Байпасный шкаф и трансформаторы встроены в ПЧ. Шкаф инвертора состоит из собранных последовательно силовых ячеек по технологии «перекрытия» — т.е., получения выходного напряжения напрямую посредством волны перекрытия. В каждой силовой ячейке есть встроенный байпасный модуль для защиты.

**Описание силовой ячейки**

Силовая ячейка преобразователя (рис. 6, 7) состоит из трехфазного выпрямителя, собранного по схеме моста Ларионова, сглаживающего фильтра звена постоянного тока и однофазного выходного инвертора. Напряжение со вторичных обмоток трансформатора через плавкие предохранители поступает на вход трехфазного выпрямителя, преобразуется в напряжение постоянного тока и сглаживается фильтром. Далее инвертор генерирует выходное напряжение переменной частоты. Каждый силовой блок имеет одинаковые характеристики, что позволяет легко производить их замену. Для повышения надежности работы преобразователь может автоматически отключать один из неисправных блоков.

Все силовые блоки получают сигналы из одного и того же центрального контроллера процесса. Существует разность фаз во вторичных обмотках трансформатора, которые обеспечивают энергией силовую ячейку, при этом, большая часть тока гармонической составляющей, вызванная независимой силовой ячейкой, будет устранена, таким образом ток первичной обмотки представляет собой приблизительно синусоидальную волну, ток гармонической составляющей, поступающий в электродвигатель, очень незначителен, даже при номинальной нагрузке, коэффициент гармоник ниже 3%.

Используется блочная структура. Каждая силовая ячейка смонтирована на отдельной полке. Для отключения и подключения до-

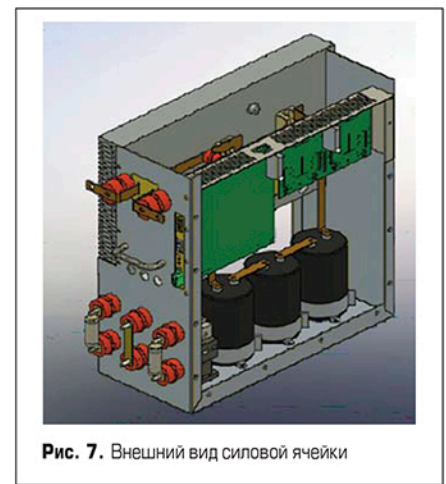
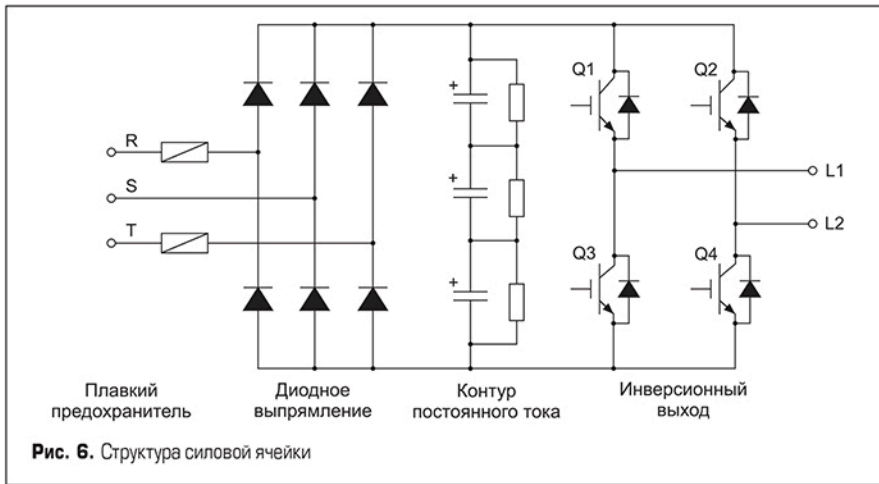


Рис. 4. Шкаф инвертора с блоком силовых ячеек



Рис. 5. Шкаф контроллера управления





статочно подсоединить пять силовых клемм и два оптоволоконных кабеля. В случае отказа силовой ячейки система управления блокирует неисправный модуль и выводит сообщение на экран панели оператора. После подключения заменяемого модуля система управления производит его тестирование входным напряжением 380 В и, в случае успешного прохождения теста, подключает к силовой цепи.

Система управления обеспечивает защиту преобразователя от короткого замыкания, перегрузки по току, перегрузки, пропадания и дисбаланса фаз (рис. 8). Кроме того, обрабатываются ошибки процессора, перегрев системы охлаждения и т. п. Сообщения об ошибках отображаются на экране панели оператора.

**Пример получения напряжения 10 кВ с использованием последовательного соединения силовых ячеек**

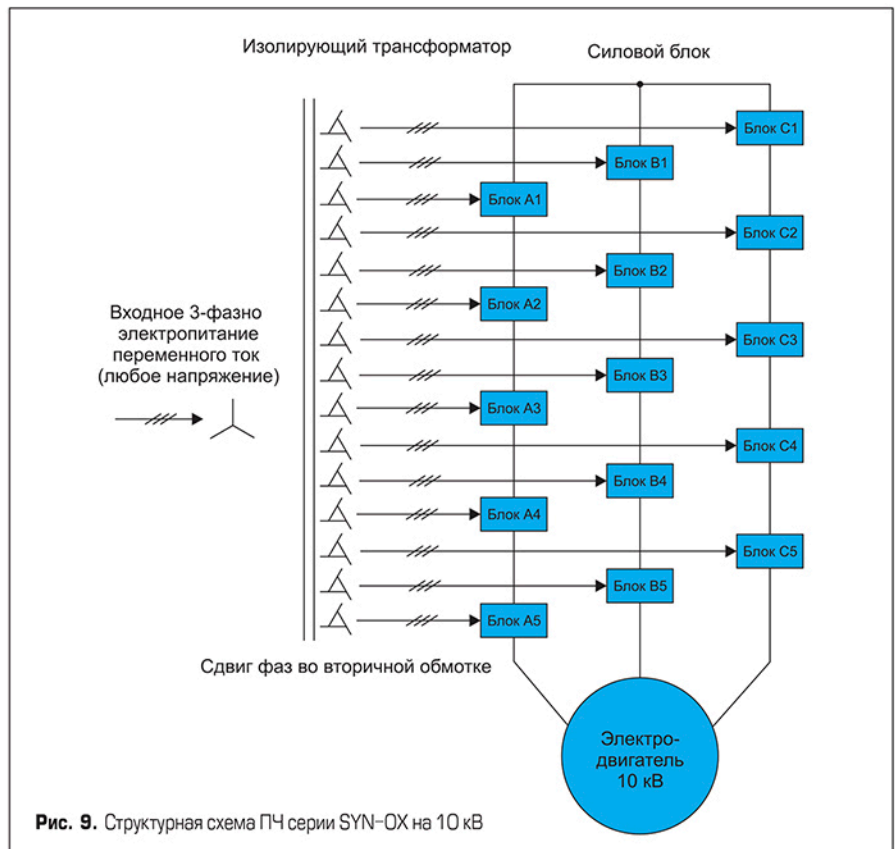
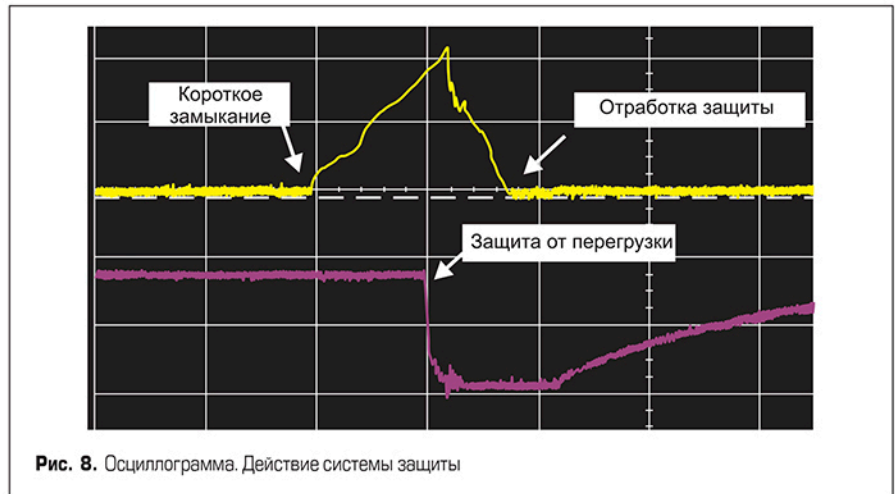
ПЧ серии SYN-OX на 10 кВ (рис. 9) состоит из 24 силовых блоков переменного тока по 720 В. Каждые восемь из них соединены последовательно (рис. 10, 11) для формирования одной фазы ( $8 \times 720 = 5760$  В — фазовое напряжение). Трехфазное соединение по схеме «звезда» —  $5760 \times 1,732 = 9976$  В, таким образом, линейное напряжение на выходе ПЧ составит 10 кВ.

В таблице 3 показано, что выходное напряжение инвертора может быть различным, как и число силовых ячеек, но принцип работы один и тот же.

Каждый силовой блок запитан от своей обмотки фазосдвигающего трансформатора, которые в сумме компенсируют гармоники, создаваемые полупроводниковой частью ПЧ. В каждой фазе находится восемь силовых ячеек, в сумме выдающих линейное напряжение 10 кВ (рис. 12, 13). Выходное напряжение является практически чистой синусоидой с минимальными гармоническими искажениями.

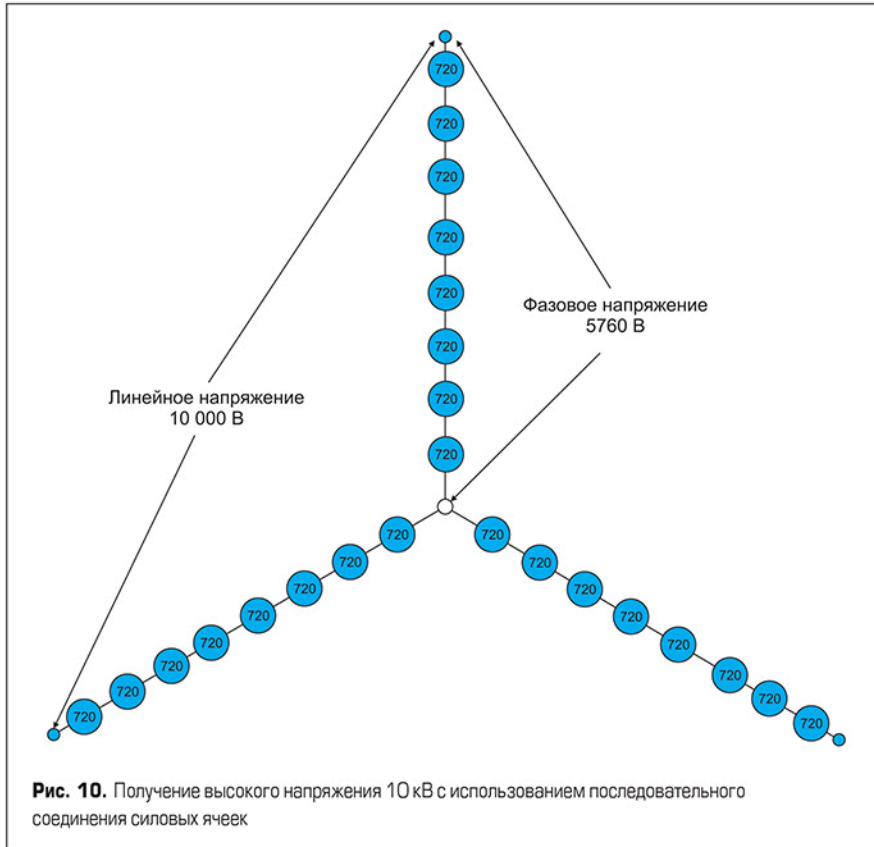
**Особенности и достоинства ПЧ серии SYN-OX**

В преобразователях серии SYN-OX используется технология многоуровневой ШИМ. Этот метод снижает скачки напряжения, уменьшает гармоники в выходном напряжении и снижает отношение  $dv/dt$ .



**Таблица 3.** Варианты комплектования инвертора силовыми ячейками для различных напряжений ПЧ серии SYN-OX

Выходное напряжение инверторов, кВ	Число ячеек на каждую фазу	Выходное фазовое напряжение, В	Выходное линейное напряжение, кВ	Число уровней напряжения на каждую фазу
3	3	1732	3	5
6	5	3450	6	11
6,6	6	3810	6,6	13
10	8	5760	10	17
11	9	6351	11	19



**Рис. 10.** Получение высокого напряжения 10 кВ с использованием последовательного соединения силовых ячеек



**Рис. 11.** Шкаф инвертора с подключенными последовательно силовыми ячейками

Байпасный шкаф обладает функцией «пяти защит», при этом он имеет линию для отключения электродвигателя и, таким образом, может использоваться как альтернативный вариант в качестве распределительного устройства среднего напряжения при подключении ПЧ к линии питания.

Принципиальная схема синхронного переключения ЭД приведена на рис 14. Начальные условия — Q1, Q2, КМ1 открыты. Алгоритм работы системы следующий:

1. КМ1 закрывается.
2. Q1 закрывается.
3. Частотно-регулируемый привод (на схеме VFD) повышает частоту и амплитуду выходного напряжения до напряжения питающей шины (~6000 В, 50 Гц), и скорость вращения электродвигателя М1 увеличивается до номинального значения.
4. Система управления ПЧ пытается синхронизировать выходное напряжение с входным по амплитуде, частоте и фазе (углу).
5. После синхронизации входного и выходного напряжения ПЧ система управления выдает сообщение «синхронизация завершена», внешняя система управления направляет команду «закрытие Q2» и затем «открытие КМ1». В течение очень короткого времени (200–300 мс) электродвигатель питается от двух источников: от ПЧ и напрямую от сети электропитания (силовой шины). Затем (когда КМ1 открыт) система управления ПЧ прекращает отправку управляющих импульсов в модули БТИЗ, выходное напряжение становится равным 0 В в течение очень короткого времени.
6. ПЧ переходит в состояние «готов», электродвигатель питается только от сети электропитания.

Достоинства ПЧ серии SYN-OX:

- Низкий коэффициент гармоник на входе и высокий коэффициент мощности, обычное значение коэффициента мощности 0,95 по всему диапазону скоростей вращения и даже выше, нет необходимости компенсации коэффициента мощности.
- Незначительное число гармоник на выходе ПЧ, в результате чего электродвигатель не производит чрезмерный шум или избыточное тепло.
- Модульная конструкция силовых ячеек, взаимозаменяемость и легкость в техническом обслуживании и ремонте.
- Применены новейшие компоненты, главный управляющий процессор DSP F28335 и ALTERA's FPGA EP3С в целях реализации высокой обрабатывающей способности; AD-дискретизация (AD7606) с 16 битами для обеспечения точности управления системой.
- Связь по оптоволокну между системой управления и силовыми ячейками предотвращает паразитное влияние электромагнитных помех и обеспечивает изоляцию от высокого напряжения, что, в свою очередь, обеспечивает высокую надежность и помехоустойчивость системы.



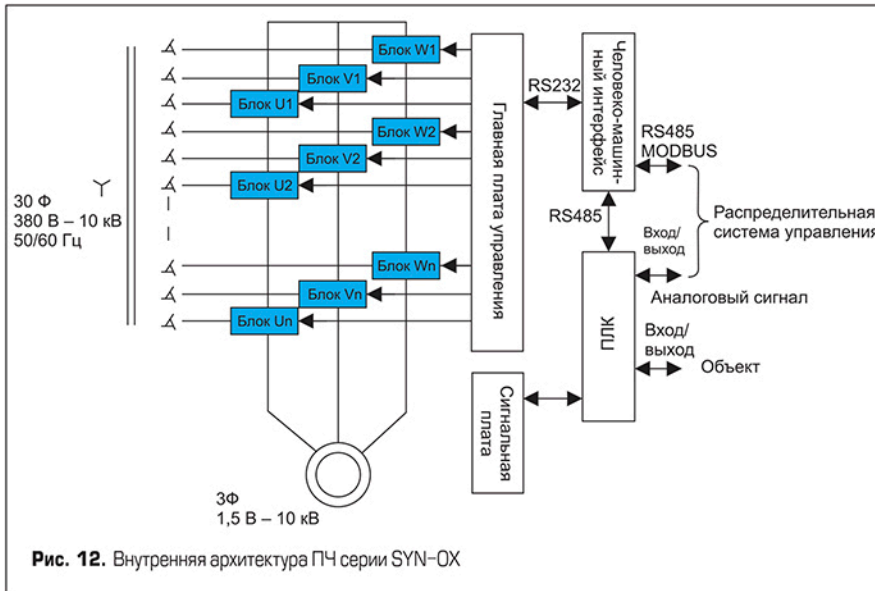


Рис. 12. Внутренняя архитектура ПЧ серии SYN-OX

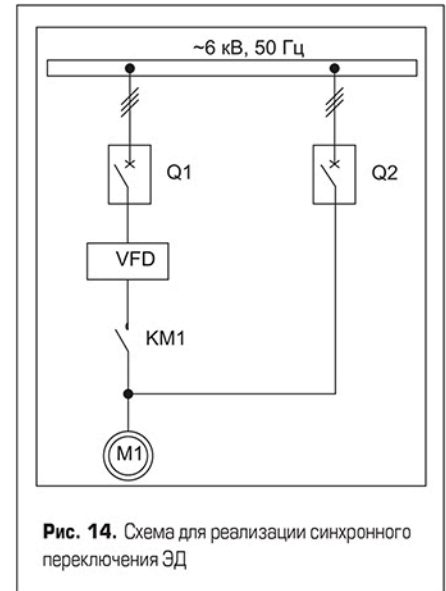


Рис. 14. Схема для реализации синхронного переключения ЭД

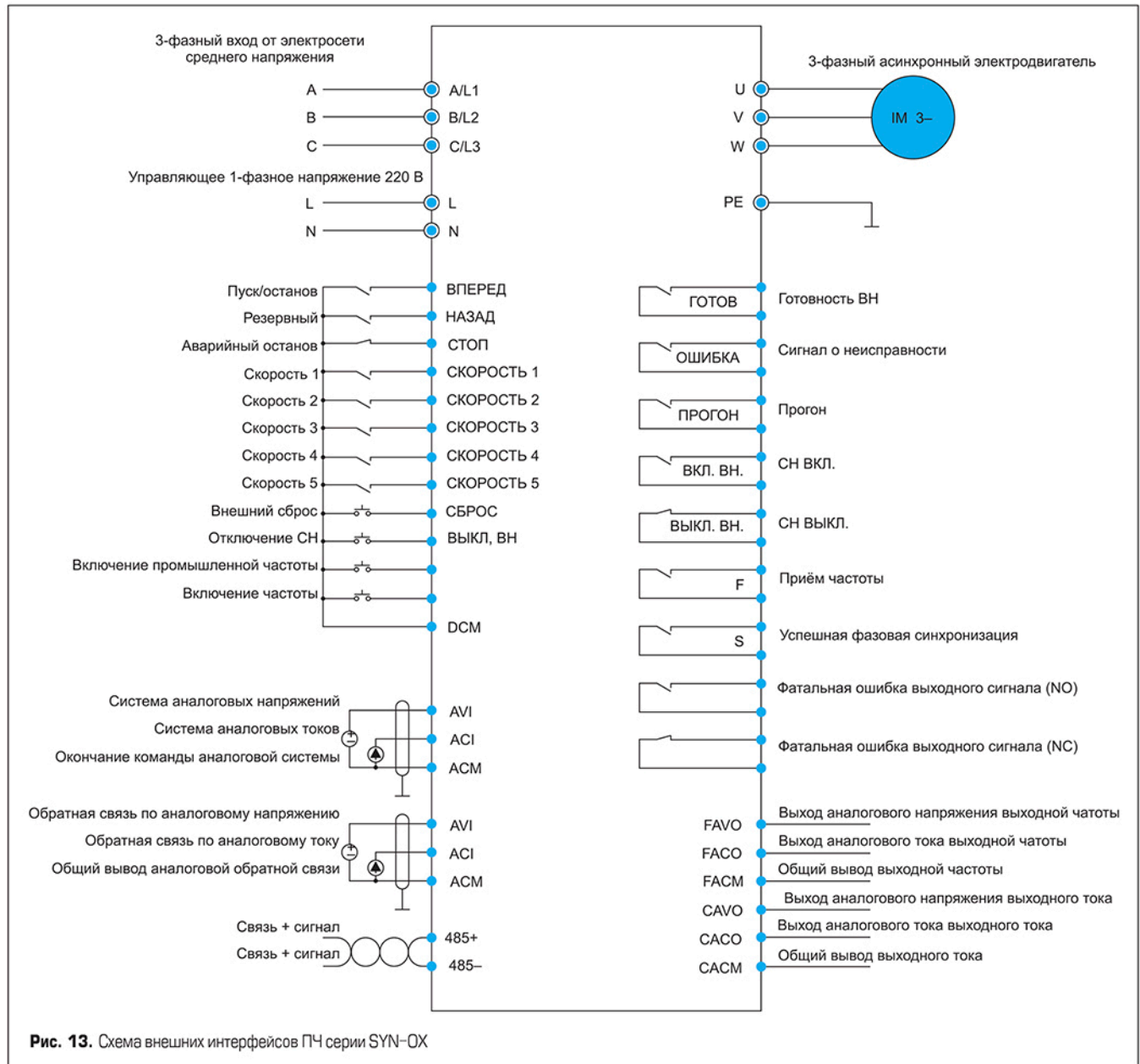


Рис. 13. Схема внешних интерфейсов ПЧ серии SYN-OX

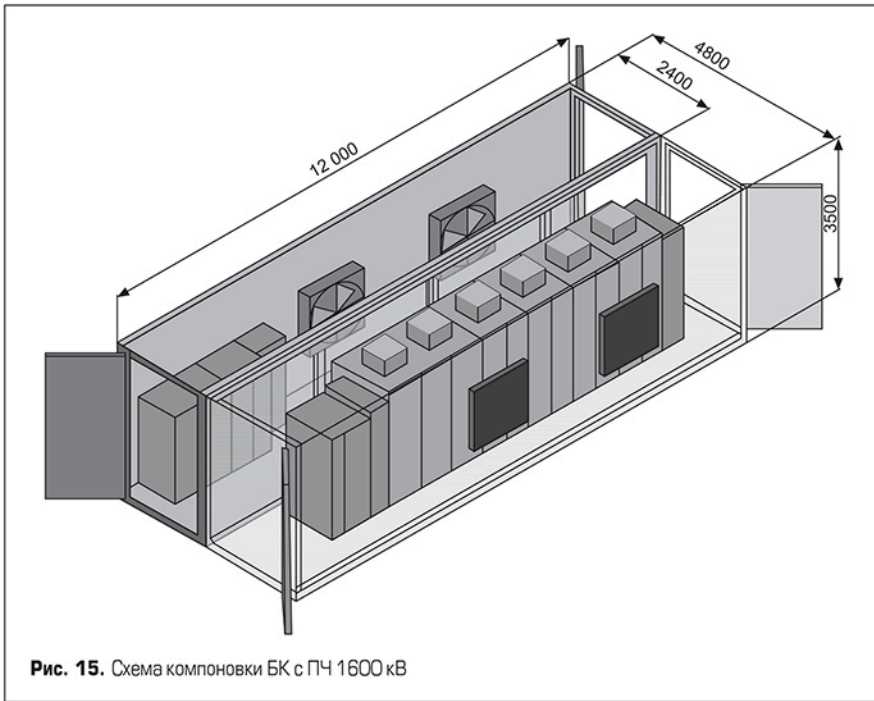


Рис. 15. Схема компоновки БК с ПЧ 1600 кВ

- Новое поколение IGBT позволяют увеличить перегрузочную способность, а значит, обеспечить своевременную защиту от перегрузки, короткого замыкания, перенапряжения, перегрузки по току и т. д. В случае выхода из строя одной из силовых ячеек в течение 1 мс срабатывает обходная система, которая выравнивает число работающих ячеек ПЧ со снижением выходной мощности.
- Система самотестирования позволяет точно обнаружить любую неисправность за счет усовершенствованных диагностических процедур контроллера.
- Инвертор может работать даже в случае наличия неисправности в части силовых блоков. Если неисправности возникают в инверторе, система может переключиться на силовую частоту через байпасную функцию.

- Гибкие методы регулирования, включая ПИД-регулятор, позволяют построить требуемый алгоритм управления электродвигателем.
- Возможность реализации дистанционного управления, эксплуатации с дистанционной системой управления и со связью с диспетчерским постом управления. Поддержка всех видов коммуникационных интерфейсов (по выбору заказчика): Profibus, Modbus, RS232, RS485 и пр.).
- КПД преобразователя достигает 96–98%. Это значительно выше, чем КПД преобразователей, построенных по двухтрансформаторной схеме. Высокий КПД позволяет уменьшить нагрев системы управления и упрощает ее охлаждение.

Приборы соответствуют международным стандартам GB 3797–2005, GB/T 15139-94/12668–2006/2900.18–2008/3859.1–1993, IEE 519–1992, IEC 60076/61000:2002.

ПЧ серии SYN-OX могут быть использованы для всех видов нагрузок со стандартным электродвигателем высокого напряжения. В результате применения достигаются:

- плавный пуск двигателя;
- бесступенчатая регулировка скорости;
- уменьшение энергопотребления двигателя и, соответственно, затрат на электроэнергию;
- увеличение срока службы оборудования;
- простота обслуживания.

Преобразователи могут быть размещены в специальном блок-контейнере (предлагается производителем в исполнении «Север») (рис. 15).