

ТИРИСТОРНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТЫ ДЛЯ ИНДУКЦИОННЫХ ПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ И НАГРЕВАТЕЛЕЙ СРЕДНЕЙ ЧАСТОТЫ

В.И. Лузгин, А.Ю. Петров, С.Ю. Кропотухин, К.В. Якушев, А.Ю. Борисов

(Российская электротехнологическая компания, УГТУ-УПИ, г. Екатеринбург)

Российская электротехнологическая компания является ведущим производителем в России преобразователей частоты, которые используются в качестве источников электропитания широкого ряда индукционных плавильных печей, имеющих различную вместимость тигля и предназначенных для плавки различных металлов и сплавов. При этом параметры системы электропитания индукционных печей и нагревателей могут иметь разнообразное сочетание по частоте от 0,15 до 10 кГц, по напряжению от 200 до 3000 В, по мощности от 3,0 до 10000 кВт. Чтобы удовлетворить указанным требованиям, необходимо было разработать несколько серий преобразователей частоты, которые выполняются по разным схемотехническим решениям на основе силовых однооперационных тиристорных и освоить их промышленное производство.

Для питания среднетоннажных индукционных печей вместимостью тигля от 0,06 до 0,8 тонны разработана серия тиристорных преобразователей частоты ТПЧП с питающим напряжением трехфазной сети 0,4 кВ, мощностью от 160 до 800 кВт и частотой от 0,5 до 4 кГц. Эти преобразователи собираются по мостовой схеме параллельного инвертора тока и мостовой схеме управляемого трехфазного выпрямителя. В силовой схеме преобразователей используются, в основном, российские комплектующие: быстродействующие тиристоры типа ТБ и ТБИ (производства ЗАО "Протон-электротекс", г. Орел) высокого класса напряжения, что позволяет устанавливать по одному тиристорному плечу инвертора, низкочастотные тиристоры типа Т (производства той же фирмы) в плечах управляемого выпрямителя, фильтровые водоохлаждаемые дроссели типа СРОВ первого, второго и третьего габаритного размера на токи 650, 1000, 1600 А (производства ЗАО "РЭЛТЕК"), автоматические выключатели серии ВА (производства предприятия ЗАО "Контактор", г. Ульяновск). Применение отечественной элементной базы позволяет существенно снизить стоимость комплектующих, сократить сроки их поставки и обеспечить оперативный ремонт преобразователей.

Система управления преобразователей частоты данной серии построена на принципе самовозбуждения, когда формирование импульсов управления вентилями инвертора синхронизировано напряжением нагрузочного колебательного контура, а формирование импульсов управления вентилями выпрямителя синхронизировано напряжением питающей сети. При управлении режимами работы преобразователей частоты осуществляется фазовое регулирование инвертора и выпрямителя. В аварийных режимах отключение преобразователя

осуществляется выпрямителем, который переводится в инверторный режим для гашения энергии фильтрового дросселя, и автоматическим выключателем.

Система управления имеет как аналоговое, так и цифровое исполнение. Цифровая система управления собрана на программируемых контроллерах и программируемых логических интегральных микросхемах, которая работает под управлением специально разработанного программного комплекса, обеспечивающего надежную работу преобразователя частоты на нагрузку с широким диапазоном изменения эквивалентных параметров в регулировочных, пусковых и аварийных режимах. Передача управляющих импульсов на силовые вентили осуществляется по оптоволоконным кабелям, а формирование управляющих импульсов с требуемыми параметрами производится индивидуальными драйверами для каждого силового вентиля. Информация о режимах работы преобразователя отражается на жидкокристаллическом дисплее, установленном на панели управления.

Конструктивно преобразователи серии ТПЧП выполняются в унифицированных пыле- влагозащищенных шкафах, соответствующих степени защиты IP54. Специально разработанная рамная конструкция сборных шкафов допускает высокую механическую нагрузку массой до 2 тонн.

Силовые полупроводниковые приборы установлены в водоохлаждаемых радиаторных системах с механизмом контролируемого усилия сжатия. Кроме этого, система водяного охлаждения обеспечивает охлаждение обмоток фильтрового дросселя и шинпроводов.

Технические характеристики преобразователей серии ТПЧП с напряжением питания промышленной сети 0,4 кВ приведены в таблице 1. Преобразователи этой серии имеют три базовые модели мощностью 320, 500, 800 кВт и ряд исполнений на частоты от 0,5 до 4,0 кГц.

Таблица 1

ТИП БАЗОВОЙ МОДЕЛИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ	ИСПОЛНЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ	$U_{\text{пит.}}$, В	$U_{\text{вых.}}$, В	$F_{\text{вых.}}$, кГц	ГАБАРИТНЫЕ РАЗМЕРЫ, мм	МАССА, кг
ТПЧП-320-0,5	ТПЧП-320-1,0 ТПЧП-250-2,4 ТПЧП-160-4,0	3х380	800	0,5 1,0 2,4 4,0	920х870х2130	750
ТПЧП-500-0,5	ТПЧП-500-1,0 ТПЧП-320-2,4 ТПЧП-250-4,0			0,5 1,0 2,4 4,0		
ТПЧП-800-0,5	ТПЧП-630-1,0			0,5 1,0	1560х870х2130	1250

Базовые модели преобразователей частоты серии ТПЧП представлены на рис. 1 и 2. Общий вид преобразователя ТПЧП-500-0,5 с аналоговой системой управления приведен на рис. 1, преобразователь ТПЧП-800-0,5 с цифровой системой управления изображен на рис. 2.



Рис. 1. Преобразователь частоты
ТПЧП 500-0,5
с аналоговой системой управления



Рис. 2. Преобразователь частоты
ТПЧП-800-0,5
с цифровой системой управления

Преобразователи частоты мощностью свыше 800 кВт целесообразно подключать к питающей энергосистеме через индивидуальные трансформаторы с первичным напряжением промышленной сети 6, 10 кВ и повышенным вторичным напряжением. При этом проектирование преобразователей частоты повышенной единичной мощности необходимо проводить с учетом существующих серий трансформаторов, выпускаемых предприятиями электротехнической промышленности. Наиболее соответствующими для этих целей являются серии преобразовательных масляных трансформаторов ТМП и сухих трансформаторов ТСЗП, предназначенных для питания преобразователей для электроприводов постоянного тока. Эти трансформаторы выполняются на ряд вторичных напряжений 0,57; 0,7; 0,9 кВ, которым соответствует выпрямленное напряжение под нагрузкой 660, 825, 1050 В и выходное напряжение инвертора при рациональных углах управления 1000, 1300, 1600 В.

Предприятием ЗАО "РЭЛТЕК" разработаны и производятся три базовые модели преобразователей частоты типа ТПЧП с повышенным выходным напряжением мощностью 1000, 1200, 1800 кВт и ряд их исполнений на частоты 0,25-4,0 кГц.

Технические характеристики этих преобразователей приведены в таблице 2.

Таблица 2

ТИП БАЗОВОЙ МОДЕЛИ	ИСПОЛНЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ	$U_{\text{пит.}}$ В	$U_{\text{вых.}}$ В	$F_{\text{вых.}}$ кГц	ГАБАРИТНЫЕ РАЗМЕРЫ,	МАССА, кг
--------------------	----------------------------	------------------------	------------------------	--------------------------	---------------------	--------------

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ					мм	
ТПЧП-1000-0,5	ТПЧП-800-1,0 ТПЧП-630-2,4 ТПЧП-500-4,0	3x570	1000	0,5 1,0 2,4 4,0	1553x870x2130	1250
ТПЧП-1200-0,5	ТПЧП-1200-1,0 ТПЧП-1000-2,4 ТПЧП-800-4,0	3x570	1000	0,5 1,0 2,4 4,0	2500x1330x2130	2000
ТПЧП-1800-0,25	ТПЧП-1800-0,5 ТПЧП-1600-1,0	3x900	1600	0,25 0,5 1,0	2500x1330x2130	2600
	ТПЧП-1400-0,25 ТПЧП-1400-0,5 ТПЧП-1400-1,0	3x700	1300	0,25 0,5 1,0		

На рис. 3 представлена базовая модель преобразователя частоты ТПЧП-1800-0,25 с цифровой системой управления. Преобразователи указанных типов используются для питания токами средней частоты индукционных печей, предназначенных для плавки чугуна и стали, с тиглями вместимостью от 1 до 3 тонн, а также для питания индукционных нагревателей кузнечных заготовок большой мощности.



Рис. 3. Тиристорный преобразователь частоты
ТПЧП-1800-0,25
с цифровой системой управления

Для крупнотоннажных печей вместимостью от 4 до 16 тонн системы электропитания должны развивать мощность от 2600 до 10000 кВт на частоте 0,15-0,25 кГц. В основе принципов построения преобразователей частоты большой мощности принят модульный подход наращивания выпрямительного, дроссельного и инверторного оборудования. При этом конструктивно отдельными модулями выполняются выпрямительно-инверторные секции и секции, в

которых установлены фильтровые дроссели типа СРОВ третьего и четвертого габаритного размера на ток 1600 и 2500 А. С увеличением мощности преобразователей частоты повышается фазность силового выпрямителя, который собирается по схемам 6-ти, 12-ти или 24-х фазного выпрямления, что позволяет ограничивать уровень гармонических составляющих тока в питающей сети на требуемом уровне. Инверторные секции также собираются по схемам параллельного инвертора тока с мультиэнергоканальным выходом, что обеспечивает возможность управления потоками энергии на секциях индуктора плавильной печи при реализации различных металлургических процессов на разных стадиях плавки металлов, или на индукторах проходной индукционной печи для управления нагревом заготовок.

В таблице 3 приведены основные технические характеристики базовых моделей преобразователей частоты серии ТПЧП модульной конструкции. Общий вид модульной конструкции преобразователя частоты ТПЧП-5200-0,25 представлен на рис. 4.

Таблица 3

ТИП БАЗОВОЙ МОДЕЛИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ	ИСПОЛНЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ	U _{пит.} , В	U _{вых.} , В	F _{вых.} , кГц	ГАБАРИТНЫЕ РАЗМЕРЫ, мм	МАССА, кг
ТПЧП-2600-0,25	ТПЧП-2600-0,5 ТПЧП-2600-1,0	3х900	1600	0,25 0,5 1,0	3740х1330х2100	5000
ТПЧП-3600-0,25	ТПЧП-3600-0,5 ТПЧП-3600-1,0	6х900	1600	0,25 0,5 1,0	3740х1330х2100	5000
ТПЧП-5200-0,25	ТПЧП-5200-0,5 ТПЧП-4200-1,0	6х900	3000	0,25 0,5 1,0	3840х1330х2100	8500
ТПЧП-10000-0,15	ТПЧП-10000-0,25 ТПЧП-10000-0,5 ТПЧП-10000-1,0	12х900	3000	0,15 0,25 0,5 1,0	7700х1330х2100	17000

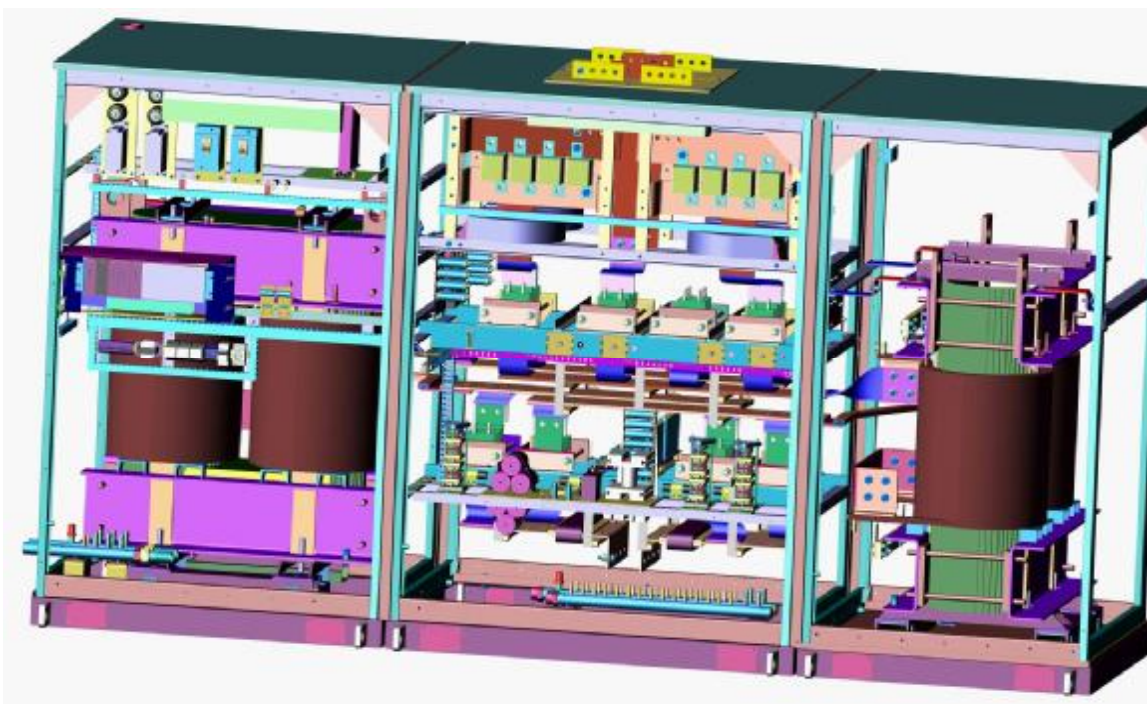


Рис. 4. Тиристорный преобразователь частоты ТПЧП-5200-0,25

Современный подход к организации металлургических производств на основе индукционных плавильных агрегатов состоит в том, что плавку металла ведут одновременно в нескольких печах с фазовым сдвигом работы каждой печи в цикле порционной плавки. При этом регулирование мощности на печах производят так, что общая мощность энергопотребления остается неизменной, что позволяет снизить установленную мощность трансформаторного, дроссельного и выпрямительного оборудования системы электропитания примерно на 40%. Для реализации этого способа организации плавки в индукционных печах предприятием "РЭЛТЕК" разработана и освоена в производстве серия преобразователей частоты ТПЧД, имеющих два независимых энергетических выхода для питания двух одновременно работающих индукционных печей. Преобразователи этого типа позволяют плавно перераспределять мощность между печами по ходу плавки, поддерживая неизменным общее потребление электроэнергии при высоких показателях качества ее потребления.

В таблице 4 приведены технические характеристики преобразователей частоты типа ТПЧД мощностью от 500 до 10000 кВт. Конструкция преобразователей этой серии строится по модульному принципу аналогично конструктивному ряду преобразователей серии ТПЧП.

Таблица 4

ТИП БАЗОВОЙ МОДЕЛИ	ИСПОЛНЕНИЯ	$U_{пит.}$	$U_{вых.}$	$F_{вых.}$	ГАБАРИТНЫЕ РАЗМЕРЫ,	МАССА,
--------------------	------------	------------	------------	------------	---------------------	--------

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ	ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ	В	В	кГц	мм	кг
ТПЧД-500-1,0	ТПЧД-400-2,4	3x380	2x(0-800)	1,0 2,4	1365x870x2130	1000
ТПЧД-800-0,5	ТПЧД-800-1,0	3x380		0,5 1,0	1553x870x2130	1250
ТПЧД-1800-0,25	ТПЧД-1800-0,5	3x900	2x(0-1800)	0,25 0,5	2500x1330x2130	2600
ТПЧД-2600-0,25	ТПЧД-2600-0,5	3x900		0,25 0,5	3740x1330x2130	5000
ТПЧД-4200-0,25		6x900		0,25	3840x1330x2130	8500
ТПЧД-5200-0,25		6x900	2x(0-3000)	0,25	5050x1330x2130	8800
ТПЧД-10000-0,15	ТПЧД-10000-0,25	12x900		0,15 0,25	10100x1330x2130	18000

Малые индукционные печи с тиглями, вместимостью дл 0,06 тонны, работают на частотах 2,4 кГц и выше. Кроме этого, большинство нагревательных установок работает в диапазоне частот 2,4-10 кГц. Для питания этих установок предприятием ЗАО "РЭЛТЕК" выпускаются преобразователи частоты серии ТПЧР мощностью 100-320 кВт, частотой 2,4-10 кГц. Преобразователи этой серии собираются по схеме резонансного инвертора с диодами встречного тока, работающего в режиме удвоения частоты выходного тока на частоте 10 кГц и в режиме без умножения частоты выходного тока на частотах 2,4-4,0 кГц. По цепи постоянного тока резонансный инвертор получает питание от неуправляемого мостового трехфазного выпрямителя, на выходе которого установлен индуктивно-емкостной фильтровый контур. Массогабаритные и стоимостные показатели последнего оказываются значительно меньше, чем у преобразователей с параллельным инвертором тока, поскольку при работе резонансного инвертора с диодами встречного тока нет необходимости глубокого регулирования выпрямителя при резкопеременном характере нагрузки. Резонансный режим работы инвертора создает наиболее благоприятные условия коммутации тиристоров и обеспечивает надежную их работу на высоких частотах. Эти преимущества преобразователей серии ТПЧР обуславливают целесообразность их производства и эксплуатации в качестве источников питания на частотах, соответствующих верхней зоне среднечастотного диапазона.

В таблице 5 приведены основные технические характеристики преобразователей частоты серии ТПЧР. На рис. 5 представлен общий вид преобразователя ТПЧР-320-10 с цифровой системой управления.

Таблица 5

ТИП БАЗОВОЙ МОДЕЛИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ	ИСПОЛНЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ	U _{пит.} , В	U _{вых.} , В	F _{вых.} , кГц	ГАБАРИТНЫЕ РАЗМЕРЫ, мм	МАССА, кг
ТПЧР-100-2,4	ТПЧР-100-4,0 ТПЧР-100-10	3x380	500 500 350	2,4 4,0 10	1430×600×2130	400

ТПЧР-160-2,4	ТПЧР-160-4,0 ТПЧР-160-10			2,4 4,0 10	914x870x2130	550
ТПЧР-320-2,4	ТПЧР-320-4,0 ТПЧР-320-10			2,4 4,0 10	914x870x2130	650



Рис. 5. Тиристорный преобразователь частоты ТПЧР-320-10 с цифровой системой управления

ЗАКЛЮЧЕНИЕ:

1. Предприятием ЗАО "РЭЛТЕК" разработаны и освоены в промышленном производстве специализированные для плавильных индукционных печей и нагревательных установок одно- и мультиэнергоканальные тиристорные преобразователи частоты нового поколения. Значительно расширен ряд конструктивных исполнений преобразователей средней частоты, обеспечивающих оптимальное покрытие потребности в источниках питания для установок индукционной плавки и нагрева по сочетанию мощности, частоты и величины выходного напряжения.
2. Разработаны принципы построения универсальных для разных типов преобразователей частоты цифровых систем управления на базе программируемых контроллеров и программируемых логических интегральных микросхем. Созданы управляющие программные комплексы, позволяющие существенно расширить функциональные возможности преобразователей частоты, а также обеспечить возможность гибкой адаптации преобразователей в системах управления процессами плавки металла и нагрева заготовок.

3. Разработаны системы электропитания токами средней частоты для многопостовой плавки металлов и градиентного нагрева заготовок на основе мультиэнергоканальных тиристорных преобразователей частоты, при построении которых используются принципиально новые технические решения. Это позволяет существенно снизить установленную мощность оборудования и повысить эффективность капиталовложений при создании таких энергосистем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лузгин В.И., Петров А.Ю., Шипицын В.В., Якушев К.В. Многоинверторные среднечастотные преобразователи в системах электропитания индукционных установок. // Электротехника. – 2002. - № 9. - С. 57-63.
2. Патент № 2231906 RU. Автономный полумостовой инвертор и способ управления работой автономного полумостового инвертора / В.И. Лузгин, А.Ю. Петров, И.В. Черных, В.В. Шипицын, К.В. Якушев. Оpubл. 27.03.04. Бюл. № 9.
3. Патент № 2231904 RU. Устройство для индукционного нагрева и способ его управления / В.И. Лузгин, А.Ю. Петров, И.В. Черных, В.В. Шипицын, К.В. Якушев. Оpubл. 27.03.04. Бюл. № 9.
4. Патент № 2231905 RU. Устройство для индукционного нагрева и способ управления устройством для индукционного нагрева / В.И. Лузгин, А.Ю. Петров, И.В. Черных, В.В. Шипицын, К.В. Якушев. Оpubл. 27.03.04. Бюл. № 9.