

МНОГОИНВЕРТОРНЫЕ СРЕДНЕЧАСТОТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ИНДУКЦИОННЫХ УСТАНОВОК

В.И. Лузгин, А.Ю. Петров, В.В. Шипицын, К.В. Якушев

Уральский государственный технический университет,
Российская электротехнологическая компания, г. Екатеринбург

Индукционный нагрев и плавка металлов на средних частотах получили широкое распространение на машиностроительных и металлургических заводах как наиболее эффективный способ электронагрева. Индукционная плавка металлов в сильных электромагнитных полях стала основным методом получения черных и цветных металлов в литейном производстве в силу высокой экономичности, технологической гибкости, экологичности этого способа.

Ведущими электротехнологическими компаниями мира прекращен выпуск индукционных печей промышленной частоты (ИППЧ) и осуществлен переход на производство индукционных плавильных систем средней частоты (ИПСЧ), которые имеют несомненные преимущества, состоящие в следующем:

- расход электроэнергии вдвое меньше, чем в ИППЧ, работающих в непрерывном цикле плавки с частичным сливом металла и периодической дозагрузки шихты;
- садочный режим плавки, т.е. без использования переходящего от плавки к плавке остатка жидкого металла («болота») позволяет исключить предварительную сушку шихты и связанные с ней затраты, кроме этого, сократить расходы на футеровку, т.к. долговечность футеровки при садочном режиме плавки возрастает, и, наконец, исключить непроизводительные затраты труда, электроэнергии и материалов, связанные с невозможностью отключения ИППЧ на время перерывов в работе литейного производства;
- допустимая удельная мощность, подводимая к металлу, в 3 раза выше, чем в ИППЧ (ИПСЧ - 1000 кВт·ч/т, ИППЧ - 300 кВт·ч/т), что обеспечивает короткие циклы плавки (40-45 минут), повышает теплотехнический КПД и позволяет оптимизировать процесс образования центров кристаллизации, благодаря одноразовому нагреву металла и меньшей средней температуре в течение плавки, чем у ИППЧ, работающих с «болотом»;
- возможность работы в режиме стабилизации активной мощности на всем цикле плавки, начиная с «холодного» состояния шихты, при котором передача активной мощности на средних частотах происходит в значительной мере за счет потерь при перемагничивании ферромагнитной шихты, и заканчивая расплавом металла, когда активная мощность подводится за счет протекания вихревых токов в узком слое ванны расплава, что позволяет повысить эффективность использования установленной мощности электрооборудования при высоких показателях качества потребляемой электроэнергии.

Технологические возможности и эффективность индукционной плавки в тигельных печах в значительной мере определяются способом организации электропитания.

Система электропитания средней частоты (СЭПСЧ) строится, как правило, на основе статических преобразователей частоты, осуществляющих преобразование энергии трехфазной сети переменного тока промышленной частоты в энергию однофазного тока средней частоты.

Функционально преобразователи строятся по двухзвенной схеме и включают выпрямитель и автономный инвертор. В зависимости от мощности

выпрямитель строится по 6-пульсной, 12-пульсной или 24-пульсной мостовой схеме с соответствующим соединением обмоток силового питающего трансформатора. При этом обеспечивается снижение гармонических составляющих входного тока до требуемого уровня.

Автономные инверторы строятся по схеме инвертора тока с параллельной компенсацией индуктора печи, инвертора напряжения с последовательной компенсацией индуктора печи или резонансного инвертора, в котором последовательно с нагрузочным контуром, образованным индуктором печи и параллельно соединенным блоком компенсирующих конденсаторов, включается коммутирующий колебательный контур [1]. Схемы инвертора тока и инвертора напряжения по сути дуальны, поэтому предпочтение той или иной схем следует отдавать в зависимости от типа используемого полупроводникового прибора. В последние годы наблюдается значительный прогресс в создании силовых полупроводниковых приборов. Наряду с развитием по параметрам быстродействующих тиристоров, появились мощные IGBT транзисторы, что позволяет создавать мощные среднечастотные преобразователи на полностью управляемых полупроводниковых приборах.

Тиристоры наиболее эффективны в схемах с параллельной компенсацией нагрузки, поскольку имеют высокий класс напряжения и допускают последовательное соединение при относительно низкой мощности шунтирующих цепей, обеспечивающих равномерное распределение напряжения, что позволяет осуществлять преобразование энергии на высоких напряжениях и относительно небольших токах. Напротив, IGBT транзисторы более эффективны в схемах инверторов с последовательной компенсацией нагрузки, т.к. допускают параллельное соединение модулей без применения делителей тока и требуют значительных затрат для обеспечения распределения напряжения при их последовательном соединении.

Транзисторные инверторы обеспечивают глубокое регулирование выходных параметров электрической энергии при высоких показателях качества потребляемой энергии. В них отсутствует проблема коммутационной устойчивости. Однако при создании преобразователей большой мощности до 10 МВт и выше тиристорные инверторы все же более предпочтительны ввиду значительно возросшей единичной мощности и динамических характеристик современных быстродействующих тиристоров. Проблема повышения надежности работы тиристорных преобразователей и диапазона регулирования выходных параметров энергии более успешно решается при использовании запираемых тиристоров или IGCT структур, которые только появились на мировом рынке силовых полупроводниковых приборов.

Предприятием "РЭЛТЕК" освоено производство тиристорных преобразователей частоты на основе инвертора тока серии ТПЧП, характеристики которых приведены в таблице 1

Таблица 1

ТИП ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ	Uпит., В	Uвых., В	Pвых., кВт	Fвых., кГц	ГАБАРИТНЫЕ РАЗМЕРЫ,	МАССА, кг
------------------------	-------------	-------------	---------------	---------------	------------------------	--------------

					мм	
ТПЧП-320-2,4	3x380	800	400	2,4	1200x800x2000	650
ТПЧП-400-1,0	3x380	800	400	1,0	1200x800x2000	650
ТПЧП-500-1,0	3x380	800	500	1,0	1330x800x2340	1100
ТПЧП-630-0,5	3x380	800	630	0,5	1330x800x2340	1100
ТПЧП-630-2,4	3x570	1000	630	2,4	1330x800x2340	1100
ТПЧП-800-1,0	3x570	1000	800	1,0	1330x800x2340	1200
ТПЧП-1000-0,5	3x570	1000	1000	0,5	1330x800x2340	1200
ТПЧП-1200-1,0	3x720	1600	1200	1,0	2440x870x2405	1400
ТПЧП-1600-0,5	3x720	1500	1600	0,5	2440x870x2405	1400
ТПЧП-1800-0,25	3x720	1400	1800	0,25	2440x870x2405	1400
ТПЧП-3600-0,25	3x900	1800	3600	0,25	3480x870x2405	2400
ТПЧП-7200-0,25	3x900	1800	7200	0,25	4000x1100x2405	4500

Самый мощный из них 7200 МВт имеет 12-пульсный выпрямитель и однофазный инвертор тока, который предназначен для питания печей емкостью 10 тонн. На рисунке 1 представлена схема системы электропитания индукционной печи большой емкости с трехсекционным индуктором и блоком компенсирующих конденсаторов, также состоящим из трех секций $C_{Н1}$, $C_{Н2}$, $C_{Н3}$ и дополнительных секций $C_{Д1}$, $C_{Д2}$. Кроме этого в блоке компенсирующих конденсаторов установлены силовые коммутаторы $K_1 \div K_6$. Данная схема СЭПСЧ позволяет реализовать несколько режимов плавки.

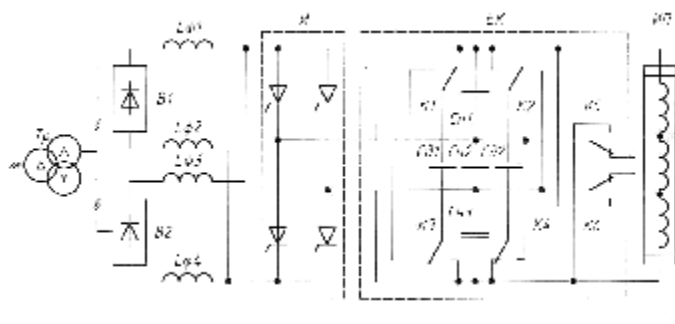


Рис. 1

На первой стадии разогрева и плавления шихты коммутаторы K_5 и K_6 соединяют отводы индукционной печи со средними выводами блока коммутирующих конденсаторов (БК), а коммутаторы $K_1 \div K_4$ подключают дополнительные секции конденсаторов параллельно секциям $C_{Н1}$ и $C_{Н2}$. При этом

$C_{Н2} = C_{Н1} + C_{Д1} = C_{Н3} + C_{Д2}$ и напряжение на секциях индуктора примерно одинаково вследствие проявления эффекта резонанса тока высокочастотного нагрузочного контура, поскольку ток инвертора в 5-7 раз ниже контурного тока.

На этой стадии ведется быстрый разогрев шихты в режиме стабилизации мощности, подводимой к нагрузке. В процессе плавки периодически осуществляется подвал шихты, значительно изменяются эквивалентные параметры индуктора, поскольку в больших пределах изменяется удельное сопротивление материала шихты, теряются его ферромагнитные свойства при переходе точки Кюри, образуется жидкая фаза металла. Для поддержания

постоянной мощности системами регулирования производится коррекция рабочей частоты инвертора. Процесс плавки ведется на повышенной частоте при допустимой удельной мощности (в 3-4 раза выше, чем в ИППЧ) по условию отсутствия выбросов металла из индуктора.

На второй стадии, когда получен расплав металла, начинается этап легирования и коррекции химического состава металла. Рассматриваемая СЭПСЧ позволяет осуществить перераспределение мощности по секциям индуктора, иными словами, произвести фокусировку мощности в отдельных зонах тигля печи и обеспечить различные виды активного перемешивания металла.

Технология фокусирования мощности в индукторе представляет собой интерес для предприятий, производящих прецизионные сплавы. В этом случае возможно "включение" различных режимов передачи среднечастотной энергии в ванну расплава металла.

На рисунке 2 показаны различные режимы фокусирования мощности. Так режим фокусирования мощности в верхней части тигля (рис. 2, а) может быть рекомендован при необходимости активного взаимодействия расплавленного металла со шлаком в режиме выдержки металла. В режиме плавки фокусирование мощности в верхней части индуктора полезно при введении легирующих добавок. Реализация этого режима фокусирования мощности достигается переключением дополнительной секции компенсирующих конденсаторов $C_{д1}$, $C_{д2}$ ключами K_1 , K_3 . При этом емкость нижней секции конденсаторов равна $C_{н3} + C_{д1} + C_{д2}$, средней секции - $C_{н2}$, а верхней - $C_{н1}$. В результате такого перераспределения емкости конденсаторов уменьшается напряжение на нижней секции и повышается на верхней секции индуктора.

Режим, изображенный на рис. 2, б, способствует активному перемешиванию металла, как в верхней части печи, так и в нижней части, что удобно использовать как в режиме плавки, так и при его выдержке для получения гомогенной структуры металла. Он реализуется при равномерном распределении напряжения по секциям индуктора при положении ключей K_1 - K_4 , когда

$$C_{н2} = C_{н1} + C_{д1} = C_{н3} + C_{д2}$$

Режим, представленный на рисунке 2, в, при котором фокусирование мощности осуществляется у основания индуктора, полезен в начальной стадии процесса плавки, когда быстрый разогрев металла в нижней части печи способствует скорейшему появлению жидкой фазы металла и ускорению процесса плавки.

В режиме выдержки металла фокусирование мощности у основания индуктора позволяет не вовлекать шлаки в ванну расплава металла, а также способствует более активному перемешиванию расплава вблизи дна печи, что весьма полезно для сплавов, имеющих состав металлов с резко дифференцированной плотностью. Данный режим реализуется в рассматриваемой СЭПСЧ переключением ключей K_2 , K_4 в положение, когда дополнительная секция конденсаторов $C_{д2}$ подключается параллельно секции

C_{H1} . В этом случае емкость компенсирующих конденсаторов верхней секции индуктора

равна $C_{H1} + C_{Д1} + C_{Д2}$, емкость средней секции - C_{H2} , а емкость нижней секции - C_{H3} .

За счет перераспределения емкости компенсирующих конденсаторов обеспечивается повышение напряжения на нижней секции индуктора печи.

Кроме рассмотренных режимов работы данная СЭПСЧ позволяет реализовать двухчастотный режим плавки. Идея этого метода состоит в том, что на стадии плавки металла этот процесс более эффективен при питании печи на повышенных частотах, а на стадии догрева металла, когда идет процесс науглероживания, требуется активное перемешивание по всему объему ванны расплава металла. Повышение интенсивности перемешивания достигается значительным снижением частоты питающего тока. В схеме СЭПСЧ на рисунке 1 путем переключения ключей K_5 и K_6 все секции компенсирующих конденсаторов подключаются параллельно индуктору печи, что позволяет снизить резонансную частоту нагрузочного контура примерно вдвое.

Данный метод дает ощутимое ускорение процесса науглероживания металла, что позволяет сократить время выдержки металла при высокой температуре.

Метод двухчастотной плавки весьма эффективен при получении нержавеющей и инструментальных сталей. Для предотвращения выжигания легирующих добавок на первом этапе выгодно как можно быстрее достичь заданной температуры расплава, а на втором этапе ввести легирующие добавки и "включить" режим активного перемешивания.

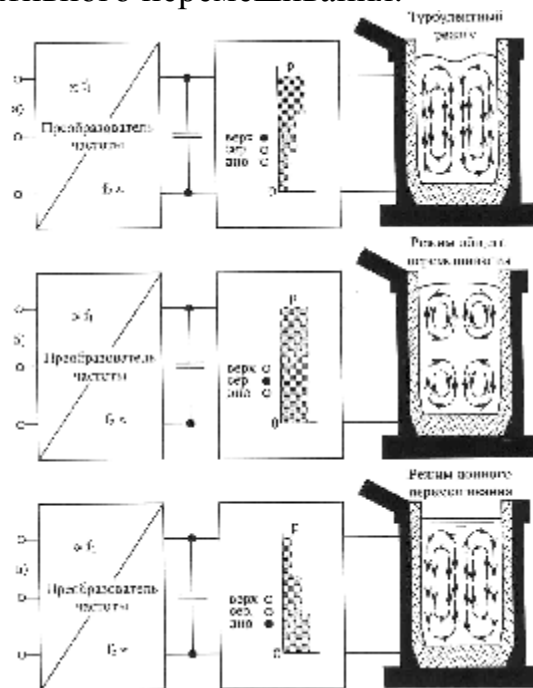


Рис. 2

Приведенные примеры доказывают, что только среднечастотные печи способны обеспечить высокое качество металлургических процессов при высокой энергетической эффективности оборудования, создавая уникальные

новые возможности технологам металлургии для получения современных сплавов.

Одноинверторные преобразователи позволяют управлять потоком энергии, подводимой к печи, осуществлять частотную автоподстройку при изменяющихся параметрах нагрузочного колебательного контура. Однако перераспределение мощности по секциям индуктора достигается с применением механических переключающих устройств, обеспечивающих подключение дополнительных секций конденсаторов, создающих разную степень перекомпенсации участков индуктора печи.

Более широкие возможности при плавке металлов обеспечивают системы электропитания с несколькими энергетическими выходами. Такие системы строятся на основе многоинверторных преобразователей частоты, в которых несколько автономно работающих инверторов получают питание от общего силового выпрямителя, причем, каждый инвертор нагружен колебательным контуром отдельных секций индуктора печи.

В зависимости от типа используемого инвертора и способа компенсации нагрузки возможно построение схемы преобразователя либо с использованием инверторов тока, последовательно соединенных относительно питающего выпрямителя и подключенных к параллельно скомпенсированным секциям индуктора печи, либо с использованием инверторов напряжения, параллельно подключенных к общему выпрямителю и работающих на последовательно скомпенсированные секции индуктора печи. На рисунке 3 изображены схемы трехинверторных преобразователей частоты, нагруженные секциями индукторов печей. Управление потоком энергии, подводимой к секциям индуктора в преобразователе, собранном на основе тиристорных инверторов тока (см. рис 3, а), осуществляется регулированием угла опережения коммутации тиристоров по отношению к напряжению на секциях индуктора.

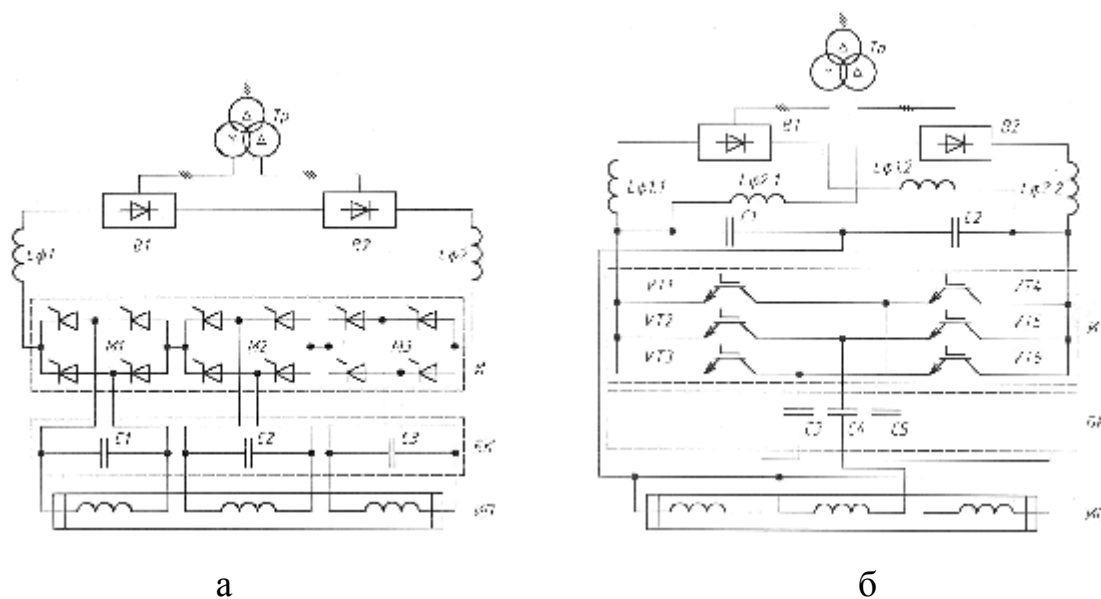


Рис. 3

Данный преобразователь позволяет реализовать технологию фокусирования мощности по высоте индуктора, постепенно вводить в действие

отдельные секции индуктора по мере наполнения печи металлом, осуществлять глубокое перераспределение мощности по секциям индуктора при полностью открытом входном выпрямителе и высоком качестве потребляемой энергии. Кроме указанных функций при синхронной работе мостов инвертора возможно создание бегущего поля в расплаве металла, что способствует более равномерному распределению электромагнитной мощности в ванне расплава металла, чем в случае пульсирующего поля, а также созданию направленных электромагнитных сил, способствующих интенсивному перемешиванию металла. Однако при плавке больших объемов тяжелых металлов, например, золота, электродинамических сил, создаваемых полями средней частоты, оказывается недостаточно для создания конвективных потоков, обеспечивающих выравнивание температуры по всему объему расплава. В этом случае требуется воздействие электромагнитного поля низкой частоты 0,5-2 Гц, которое вызывает повышенное удельное силовое давление в глубинных слоях ванны расплава металла. Рассматриваемая система электропитания позволяет осуществить низкочастотную модуляцию напряжения на секциях индуктора печи, создать низкочастотную волну электромагнитного поля по вертикальной оси тигля печи и обеспечить управляемое перемешивание металла в сочетании с интенсивным нагревом.

Модуляционный метод электромагнитного перемешивания металла особенно эффективен при плавке металлов в индукционных печах с проводящими или полупроводящими тиглями. Коэффициент полезного действия индукционных печей значительно возрастает при плавке металлов, имеющих высокую электропроводность, в графитовых или графитошамотных тиглях. Однако из-за сильного экранирования проводящим тиглем силовое воздействие среднечастотного магнитного поля на расплав металла резко снижается. Поэтому только низкочастотная составляющая модулированного электромагнитного поля позволяет создать силовое поле в объеме расплава металла и обеспечить его перемешивание с требуемой интенсивностью.

В связи с развитием IGBT и IGCT полупроводниковых структур, которые становятся соизмеримыми по мощности с тиристорами и значительно превосходят их по быстродействию, весьма перспективными в качестве источников питания индукционных печей становятся многоинверторные преобразователи частоты, построенные на базе полумостовых инверторов напряжения (рис. 3, б). В данной схеме управление потоком энергии осуществляется частотным методом на резонансной характеристике последовательного контура, образованного секцией индуктора печи и компенсирующим конденсатором. При этом осуществляется глубокое регулирование мощности за счет индуктивной расстройки нагрузочного резонансного контура или при изменении длительности интервала проводимости транзисторов.

В инверторах с последовательной компенсацией низкосинусной нагрузки развиваются большие токи через вентили (в 5-7 раз выше, чем при параллельной компенсации), однако при этом уровень напряжений определяется питающим напряжением и не зависит от колебаний напряжения

на нагрузке, что позволяет весьма эффективно использовать IGBT структуры. При этом достигается высокая надежность работы преобразователя, обеспечиваются широкие возможности управления потоком энергии и создания специфических технологических эффектов при активном управлении процессом плавки.

Повышение эффективности систем среднечастотной плавки металлов достигается при организации групповой плавки металла одновременно в нескольких печах или, так называемого, многопостового метода плавки. Сущность этого метода состоит в том, что процесс плавки в разных печах сдвинут по фазе технологического цикла плавки – одна печь работает в режиме нагрева и расплавления металла с большим потреблением активной энергии, вторая печь находится в режиме выдержки и теплосхранения металла с малым потреблением энергии (10-20% от энергопотребления в режиме плавки), а третья печь – в режиме разливки металла и загрузки шихтой без потребления энергии. Метод многопостовой плавки требует нового подхода к организации энергоснабжения.

В последние годы получили развитие системы электропитания двух или нескольких одновременно работающих печей от одного источника, в которых имеется возможность гибкого перераспределения подводимой энергии от одной печи к другим [2]. Основой такой системы является статический многоинверторный преобразователь частоты, в котором питание инверторов постоянным током осуществляется от общего выпрямителя, а выход каждого инвертора подключается к колебательному контуру каждой печи (см. рис. 4).

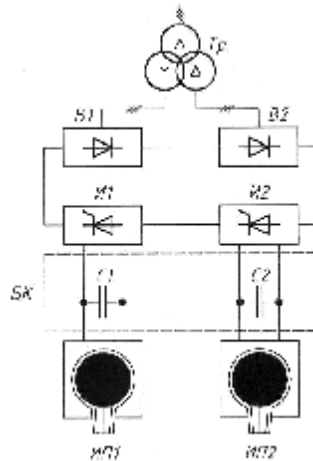


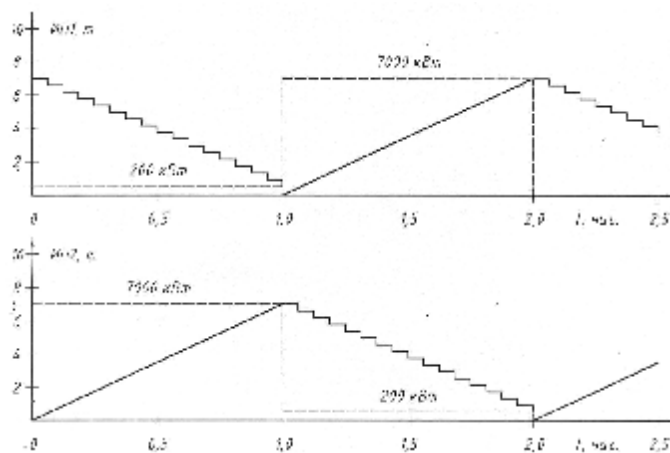
Рис. 4

Преимущества систем электропитания для многопостовой плавки металлов на основе многоинверторных преобразователей частоты состоят в следующем:

1. Мощность источника питания, подводимая к каждой печи, может изменяться от 0 до 100%, при этом каждая печь может быть настроена на свой режим работы. В этом их существенное отличие от систем электропитания дуговых печей и печей промышленной частоты.

2. Отсутствуют переключатели механического типа и второй источник питания для выдержки металла. Источник питания загружен на 100% в ходе технологического процесса плавки, что позволяет снизить его установленную мощность на 40% и выровнять график суточного потребления энергии.
3. Можно одновременно на двух печах выполнять сушку футеровки и сушку шихты, либо осуществлять на одной печи сушку футеровки, на другой - плавку металла, уменьшая время межремонтных простоев печей.
4. Обеспечивается высокая эффективность работы оборудования, увеличивается производительность печей на 20-30%.
5. Улучшаются массогабаритные показатели.

На рисунке 5 приведена циклограмма работы двух 10-тонных печей, питание которых осуществляется от источника питания с двумя выходами. В режиме теплосохранения источник выдает для одной печи мощность 200 кВт, а для другой – 7000 кВт и обеспечивает режим скоростной плавки металла во второй печи. Этот метод плавки позволяет либо подстраиваться под необходимый темп потребления металла литейным цехом, который, например, в течение производственного цикла 8 часов требует общее количество расплава 80 тонн со средней производительностью 10 тонн/час. Но в действительности требуемое ежечасное количество расплава колеблется от 5 до 15 тонн/час. Из рисунка 5 видно, что источник попеременно питает печи ИП1 и ИП2 мощностью плавки 7000 кВт и мощностью теплосохранения 200 кВт, что удовлетворяет требованию ежечасного количества расплава 5-15 тонн при средней производительности 10 тонн/час. При этом коэффициент использования установленной мощности оборудования источника питания близок к 100%.



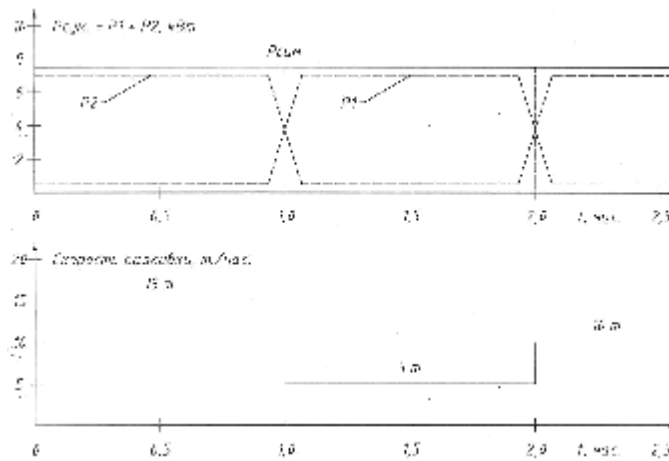


Рис. 5

Благодаря преимуществам и экономичности данного способа плавки ведущие мировые производители выпускают подобные системы. Компания АВВ (Швеция) предлагает систему "Twin Power System" с двумя печами. Компания "AJAX" (США) запатентовала систему "Pacer Power Share System". Компания "JUNKER" (Германия) предлагает на мировом рынке систему "DUOMELI TANDEM OPERATION SISTEM". Компания "INDUCTOTHERM" (США) разработала системы "DUAL TRAK" и "TRY TRAK", позволяющие вести плавку одновременно в двух или в трех печах.

Компанией "РЭЛТЕК" разработаны системы двухпостовой среднечастотной плавки металлов с печами емкостью 2.5, 6.0 и 10 тонн. Для питания таких печей производятся двухинверторные тиристорные преобразователи частоты типа ТПЧД, технические характеристики которых приведены в таблице 2.

Таблица 2

ТИП ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ	ТИП ПИТАЮЩЕГО ТРАНСФОРМАТОРА	МОЩНОСТЬ ВЫПРЯМИТЕЛЯ, кВт	МОЩНОСТЬ ИНВЕРТОРОВ, кВт	НОМИНАЛЬНАЯ ЧАСТОТА, кГц
ТПЧД-2200-0,25	ТСЗП-2500-10У2	2200	1800/1800	0,25
ТПЧД-3600-0,25	ТСЗП-4000-10У2	3600	3600/3600	0,25
ТПЧД-7200-0,25	ТСЗП-8000-10У2	7200	7200/7200	0,25

Общая тенденция к автоматизации процессов нашла свое развитие и в электронагреве. В современных системах индукционной плавки с помощью компьютерных и микропроцессорных устройств информация от датчиков передается открытым или замкнутым управляющим системам с искусственным интеллектом. В этих системах сгруппированные параметры используются для правильного ведения процесса плавки и его оптимизации. Эти параметры рассчитываются компьютером, передаются на экран дисплея и протоколируются.

Контроль плавильного производства на основе электронной вычислительной техники, реализует рациональную стыковку всех видов технологических операций, составляющих совокупный процесс плавки

металла. Система управления процессом плавки должна решать следующие задачи:

- сырьевой контроль (расчеты сырьевых компонентов, контроль складских запасов, регулировка химического состава и др.);
- контроль и управление плавильным процессом (регулирование подводимой энергии, контроль температуры, осуществление операций взвешивания, автоматическая сушка печной футеровки и шихты и т.д.);
- диагностика печей (контроль за температурой охлаждающей воды, состояния футеровки, исправление возникающих неполадок и сообщение о них);
- сохранение, анализ и оценка всех параметров печи.

Использование компьютерных систем управления позволяет снизить напряженность труда и повысить производственную надежность систем индукционной плавки металлов. Применение гибких систем электропитания индукционных печей с широкими функциональными возможностями открывает новые перспективы повышения эффективности и качества металлургических процессов, что чрезвычайно важно в рыночных условиях производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лузгин В.И., Петров А.Ю., Сабитов А.К. и др. Система электропитания для многопостовой среднечастотной плавки металла // Техническая электродинамика, - 2000, - ч. 6, - С. 68-71.
2. Викар Х. автоматизация плавки в литейном производстве ISSN0024. Литейное производство, 1994, № 6.