

ДВУХПОСТОВЫЕ ДВУХЧАСТОТНЫЕ УСТАНОВКИ ИНДУКЦИОННОЙ ПЛАВКИ МЕТАЛЛОВ ДЛЯ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

В.И. Лузгин, А.Ю. Петров, Ф.Н. Сарапулов, В.В. Шипицын, И.В. Черных

Российская электротехнологическая компания, Уральский государственный
технический университет-УПИ, г. Екатеринбург, РОССИЯ

В статье рассматриваются новые принципы построения систем двухпостовой индукционной плавки металлов в электромагнитных полях средней и низкой частоты, в которых достигается высокая технологическая эффективность, универсальность и адаптивность в модульных схемах литейного производства. Описаны способы управления электромагнитными полями в рабочих объемах индукционных печей, обеспечивающих расширение их технологических возможностей при получении прецизионных сплавов металлов. Даны примеры замены вагранок на двухпостовые индукционные комплексы, а также примеры модернизации индукционных печей промышленной частоты.

В литейном производстве машиностроительных и металлургических предприятий все шире используется индукционная плавка на средних частотах благодаря высокой технологической эффективности этого способа. В России основной парк плавильных агрегатов в литейном производстве составляют коксовые вагранки (72%), индукционные печи промышленной частоты (23%) и дуговые печи (5%), которые в ближайшие годы необходимо менять на более эффективные среднечастотные индукционные печи. Значительный прогресс в развитии индукционных плавильных агрегатов достигнут за счет создания энергонасыщенных тигельных печей средней частоты (ИТПСЧ), работающих на частотах 150-3000 Гц с удельной мощностью 0,7-1,0 МВт на одну тонну металла. В ИТПСЧ плавку черных металлов можно проводить в циклическом режиме без остатка металла с короткими циклами плавки (40-45 минут), что позволяет избежать перегрева металла, точно управлять химическим составом сплава и обеспечить требуемое качество отливок.

Современные гибкие литейные производства, построенные по модульному принципу, позволяют максимально диверсифицировать литейное производство при минимальных затратах. Плавильные агрегаты в составе всего комплекса литейного оборудования является наиболее дорогими модулями, поэтому они должны быть несменными при изменении схемы организации литейного производства, а значит, должны обладать высокой универсальностью при реализации технологических процессов плавки различных металлов и сплавов, а также иметь высокую адаптированность в модульных схемах организации литейного производства. Наиболее полно требованиям универсальности и адаптивности отвечают индукционные печи, в которых можно получать практически любые сплавы с высокой точностью химического состава и однородностью, т.к. они имеют крайне низкий угар элементов и обеспечивают интенсивное перемешивание металла.

Индукционные тигельные печи промышленной частоты (ИТППЧ) имеют низкую технологическую эффективность, что связано с низкой интенсивностью процесса плавки при удельных мощностях 350-400 кВт на одну тонну металла и с большим расходом электроэнергии на тонну выплавляемого металла (более 800 кВт час/т). Кроме этого, ИТППЧ работают с определенным остатком жидкого металла, что приводит к перегреву металла и к снижению качества отливок. Однако в полях низкой частоты достигается наиболее эффективное перемешивание металла под воздействием достаточно большого силового давления электромагнитного поля на ванну расплава металла.

При плавке металлов на токах средней частоты существенно повышаются техникоэкономические показатели ИТПСЧ за счет сокращения циклов плавки и снижения удельного расхода электроэнергии (500-520) кВт ч/т). Однако по мере роста частоты питающего тока падает силовое давление электромагнитного поля, которое становится недостаточным для создания конвективных потоков металла. Очевидно, что на разных стадиях плавки частота питающего тока должна быть оптимальной по условиям наибольшей технологической эффективности. Метод двухчастотной плавки позволяет расширить технологические возможности индукционных печей и делает его особенно эффективным при получении нержавеющей и инструментальных сталей, а также для сплавов, имеющих состав металлов с резко дифференцированной плотностью. Кроме этого, ИТПСЧ может быть переведена из режима интенсивной плавки в электромагнитных полях средней частоты с большим потреблением мощности в режим микширования и подогрева металла с малым потреблением мощности на токах низкой частоты. Реализация этих функций делает ИТПСЧ еще более адаптированным модулем при организации литейного производства.

Технологические возможности и эффективность индукционной плавки в значительной мере определяется способом организации электропитания и управления параметрами электромагнитного поля в рабочем объеме индукционной печи. К системам электропитания (СЭП) индукционных печей предъявляются специфические требования. Они должны обеспечивать групповое питание токами средней частоты несколько одновременно работающих печей, формировать токи низкой частоты в обмотках печей, осуществлять глубокое регулирование мощности в печах, обеспечивая независимое управление мощностью на секции индуктора печи. На рис. 1 приведена схема двухинверторного преобразователя частоты, в которой питание постоянным током каждого инвертора I_1 , I_2 осуществляется от общего выпрямителя B_1 , B_2 [1]. Инверторы, собранные по полумостовой схеме с диодами встречного тока на полностью управляемых IGBT модулях или IGCT приборах, могут работать либо в режиме одночастотного возбуждения параллельного нагрузочного контура, образованного индуктором печи и блоком конденсаторов средней частоты (БКСЧ), либо в режиме двухчастотного формирования тока в индукторе. Во втором режиме среднечастотная составляющая тока в индукторе печи формируется как следствие резонанса токов в параллельном нагрузочном контуре, а низкочастотная составляющая тока индуктора формируется за счет широтной модуляции управляющих сигналов, подаваемых на вентили инвертора. При этом частота моду-

ляции соответствует резонансной частоте последовательного контура, образованного суммарной индуктивностью дросселя L_k и индуктора печи и емкостью блока конденсаторов низкой частоты (БКНЧ), в котором достигается резонанс напряжений и обеспечивается наибольшее значение низкочастотной составляющей тока в индукторе печи. Изменение частоты управления и глубины широтной модуляции управляющих сигналов, подаваемых на вентили инверторов, достигается независимое управление среднечастотной и низкочастотной составляющей тока индуктора, что позволяет осуществлять глубокое регулирование параметров электромагнитного поля в рабочих объемах индукционных печей. На рис. 2, а приведены диаграммы напряжения и тока в индукторе в режиме одночастотного возбуждения нагрузочного контура на этапе интенсивного нагрева и плавки металла, а на рис. 2, б показаны эти же диаграммы в режиме двухчастотного формирования тока индуктора на этапе подогрева и микширования металла.

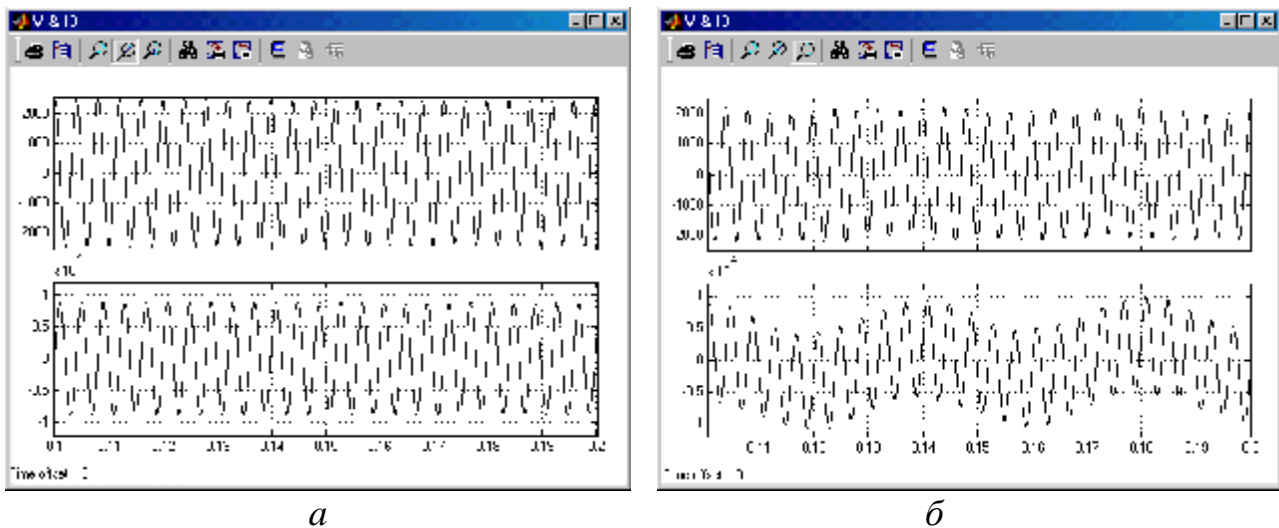


Рис.2

В последнем случае среднечастотный ток индуктора модулирован низкочастотной составляющей, возбуждающей электромагнитное поле в глубоких слоях ванны расплава металла и вызывающей повышенное силовое давление, вследствие чего усиливаются конвективные потоки металла в печи.

Независимое управление параметрами электроэнергии на выходе каждого инвертора при постоянном выпрямленном напряжении на входе позволяет наращивать по мере необходимости количество инверторных ячеек и обеспечить энергонезависимое питание как печей с секционированными индукторами, так и одновременно работающих печей на различных стадиях плавки металла в одночастотном и двухчастотном режимах возбуждения электромагнитного поля. На рис.3 приведена схема системы электропитания двухпостового индукционного плавильного комплекса, в которой два трехячейковых инвертора осуществляют питание трехсекционных индукторов двух одновременно работающих печей [2]. В такой системе появляется возможность не только перераспределять мощность, подводимую к печам, но и фокусировать мощность в различных зонах рабочего объема каждой печи. Метод зонного фокусирования мощности позволяет ускорить процесс плавки, особенно в том случае, когда в шихте зна-

чительную часть составляет стружка металла или высечка от листообработки. При этом повышение мощности в нижней секции печи позволяет быстро получить жидкий металл, в котором резко ускоряется плавка стружки и мелкой шихты и уменьшается угар металла. А при повышении мощности в верхней секции удастся активизировать химические процессы взаимодействия металла и шлака за счет подогрева последнего до более высокой температуры и активизации конвективных потоков металла под шлаком.

На стадии подогрева металла при синхронном модулировании низкочастотных составляющих тока в секциях индуктора печи с фазовым сдвигом 120 гр. эл. создается бегущее низкочастотное поле по вертикальной оси, что позволяет организовать активное перемешивание металла по всему рабочему объему печи и обеспечить быстрое легирование расплава металла.

Таким образом, системы электропитания, построенные на мощных полностью управляемых полупроводниковых приборах, позволяют расширить технологические возможности управления процессом плавки металла, используя метод двух частот и метод зонного фокусирования мощности, что делает индукционные печи наиболее конкурентными среди других типов плавильных агрегатов для применения в модульных схемах литейного производства.

Индукционные печи являются наиболее емкими потребителями электроэнергии, поэтому вопросы электромагнитной совместимости с питающей электросистемой и окружающей средой играют важную роль в общей оценке показателей качества плавильного агрегата. В зависимости от мощности электропотребления общий выпрямитель системы электропитания печей выполняется 6-ти, 12-ти или 24-фазными. Модульная конструкция выпрямителя позволяет легко наращивать его общую мощность и увеличивать фазность питающей сети, поддерживая на заданном уровне гармонические составляющие тока и напряжения в питающей сети.

Весьма важную роль в определении эффективности той или иной плавильной системы играет соотношение производительности и установленной мощности оборудования. Это соотношение существенно влияет на стоимость одной тонны выплавленного металла, которая в значительной мере определяет стоимость изделия. Снижение установленной мощности оборудования при той же производительности достигается при организации групповой плавки металла одновременно в нескольких печах, когда процесс плавки в разных печах сдвинут по фазе технологического цикла плавки [3-4]. На рис. 4 представлены циклограммы работы двухпостового плавильного комплекса с печами 10 т (M_1 , M_2) и общей мощностью источника питания 12,5 МВА. В цикле работы каждой печи активная мощность (P_1 , P_2) изменяется от 1,5 до 9,5 МВт. Однако за счет фазового сдвига графиков потребления электроэнергии в технологическом цикле работы печей достигается стабилизация общего потребления электроэнергии на уровне $\sum P = 11$ МВт, что позволяет снизить установленную мощность выпрямителя и сетевого трансформатора примерно на 40% по сравнению с вариантом индивидуального питания каждой печи. При этом производительность рассматриваемого двухпостового комплекса составляет 20 т/час, что вполне

приемлемо при замене большинства не соответствующих экологическим нормам вагранок, работающих на коксе.

Важным аспектом в вопросе модернизации плавильных агрегатов для литейного производства является перевод индукционных печей промышленной частоты на питание от источников тока средней частоты. В связи с этим должно быть найдено компромиссное техническое решение, которое реализуется с минимальными переделками и затратами на дополнительное оборудование. Современные разработки фирмы «РЭЛТЕК» в области систем электропитания печей средней частоты позволяют предложить для этой цели фазоинверсные преобразователи частоты (ПЧФИ), которые позволяют, максимально используя оборудование ИТППЧ, в частности, блок конденсаторов низкой частоты (БКНЧ) и сетевой трансформатор, реализовать двухчастотный метод плавки [5]. На рис. 5 приведена схема питания индуктора ИТППЧ, в которой дополнительными элементами является двухинверторный ПЧФИ и блок компенсации средней частоты (БКСЧ). Предлагаемая система электропитания работает в двух режимах. В первом режиме интенсивной плавки металла ПЧФИ формирует противофазные напряжения на конденсаторах БКСЧ, которые вместе с секциями индуктора образуют параллельные нагрузочные контуры для каждого инвертора (I_1 , I_2). При возбуждении этих контуров на резонансной частоте в секциях индуктора формируется среднечастотный ток наибольшей величины вследствие резонанса токов в указанных контурах. Поскольку напряжения нагрузочных контуров находятся в противофазе, среднечастотный ток по конденсаторам БКНЧ не протекает.

Во втором режиме работы ПЧФИ инверторы I_1 , I_2 работают синфазно на резонансной частоте нагрузочного контура, образованного секциями индуктора и конденсаторами БКНЧ и БКСЧ. При этом резонансная частота нагрузочного контура становится примерно равной промышленной частоте. Низкочастотный режим работы системы электропитания целесообразен на этапе подогрева и выдержки металла, когда в рабочем объеме печи формируется низкочастотное электромагнитное поле, вызывающее значительно большее силовое давление на ванну расплава металла и усиление конвективных потоков. Таким образом, рассматриваемая система электропитания шаг за шагом может переходить от режима интенсивной плавки на средней частоте к режиму миксера на низкой частоте и обратно без применения силовых переключающих устройств путем изменения лишь алгоритма управления инверторами ПЧФИ. Модернизация существующих индукционных печей промышленной частоты предложенным способом позволит устранить присущие им недостатки и значительно повысить их технологическую эффективность при относительно небольших затратах.

Фирмой «РЭЛТЕК» разработаны и производятся двухпостовые двухчастотные индукционные плавильные установки серии УИПД с печами вместимостью 3, 6, 8 и 10 т. Технические характеристики указанных комплексов приведены в таблице 1.

ТИП УСТАНОВКИ	ВМЕСТИМОСТЬ ПЕЧЕЙ, т	КОЛИЧЕСТВО ОДНОВРЕМЕННО РАБОТАЮЩИХ ПЕЧЕЙ	СУММАРНАЯ МОЩНОСТЬ ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ, кВт	ПРОИЗВОДИ- ТЕЛЬНОСТЬ, т/час
УИПД-2200-3	3	2	2200	3,6
УИПД-3600-6	6	2	3600	6
УИПД-5400-8	8	2	5400	9,5
УИПД-11000-10	10	2	11000	20

Плавильные установки снабжены цифровыми системами управления. Контроль процесса плавки обеспечивается компьютерной системой, осуществляющей рациональную стыковку всех видов технологических операций. Использование таких систем управления позволяет снизить напряженность труда и повысить производственную надежность индукционных плавильных установок. Применение гибких индукционных систем плавки металлов с широкими функциональными возможностями открывает новые перспективы повышения эффективности и качества металлургических процессов, что чрезвычайно важно в рыночных условиях производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент РФ по заявке № 2002125838/09, приоритет от 27.09.02 "Автономный полумостовой инвертор и Способ управления работой автономного полумостового инвертора" / Лузгин В.И., Петров А.Ю., Черных И.В., Шипицын В.В., Якушев К.В. Решение ФИПС о выдаче патента от 11.12.2003.
2. Патент РФ по заявке № 2002125711/09, приоритет от 26.09.02 "Устройство для индукционного нагрева и Способ управления устройством для индукционного нагрева / Лузгин В.И., Петров А.Ю., Черных И.В., Шипицын В.В., Якушев К.В. Решение ФИПС о выдаче патента от 11.12.2003.
3. Патент РФ по заявке № 2002125710/09, приоритет от 26.09.02 "Устройство для индукционного нагрева и Способ управления устройством для индукционного нагрева / Лузгин В.И., Петров А.Ю., Черных И.В., Шипицын В.В., Якушев К.В. Решение ФИПС о выдаче патента от 11.12.2003.
4. Джон Х. Мортимер. Завтрашние технологии индукционной плавки существуют уже сегодня // Литейщик России, 2002, № 1.
5. Лузгин В.И., Петров А.Ю., Шипицын В.В., Якушев К.В. Многоинверторные среднечастотные преобразователи в системах электропитания индукционных установок // Электротехника, 2002, № 9.