



The induction systems of mid-frequency melting of metals for foundry of the Russian electro-technological company are presented.

*В. И. ЛУЗГИН, А. Ю. ПЕТРОВ, С. А. РАЧКОВ, К. В. ЯКУШЕВ,
Российская электротехнологическая компания, г. Екатеринбург*

УДК 621.74

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ ИНДУКЦИОННЫЕ СРЕДНЕЧАСТОТНЫЕ ПЛАВИЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ С ПЕЧАМИ ВМЕСТИМОСТЬЮ 1–16 Т ДЛЯ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Российская электротехнологическая компания является ведущим производителем в России среднечастотных индукционных печей и комплексов оборудования плавильных участков, которые все шире используются в литейном производстве машиностроительных и металлургических предприятий. Значительный прогресс в развитии индукционных плавильных агрегатов достигнут за счет создания энергонасыщенных тигельных печей средней частоты (ИТПСЧ), работающих на частотах 150–1000 Гц с удельной мощностью 0,7–1,0 МВт на 1 т металла. В ИТПСЧ плавку черных металлов можно проводить в порционном режиме без остатка металла («болота») с короткими циклами плавки (40–45 мин), что позволяет избежать перегрева металла, точно управлять химическим составом сплава и обеспечить требуемое качество отливок.

Современные литейные предприятия, построенные по модульному принципу, позволяют максимально диверсифицировать литейное производство при минимальных затратах. Плавильные агрегаты в составе всего комплекса литейного оборудования являются наиболее дорогими модулями, поэтому они должны быть несменными при изменении схемы организации литейного производства, а значит, обладать высокой универсальностью при реализации технологических процессов плавки различных металлов и сплавов, а также иметь высокую адаптивность 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 гомогенностью, так как они имеют крайне низкий угар элементов и обеспечивают интенсивное

перемешивание металла. Кроме того, ИТПСЧ наиболее экономичны, экологичны и значительно улучшают условия труда на плавильных участках литейных предприятий.

Индукционные тигельные печи промышленной частоты (ИТППЧ) имеют низкую технологическую эффективность, что связано с малой интенсивностью процесса плавки при удельных мощностях 350–400 кВт на 1 т металла и с большим расходом электроэнергии на 1 т выплавляемого металла (более 600 кВт·ч/т). Кроме того, ИТППЧ работают с «болотом», что приводит к перегреву металла и 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 технико-экономические показатели ИТПСЧ за счет сокращения циклов плавки и снижения удельного расхода электроэнергии (500–560 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 получения сплавов, имеющих состав металлов с резко дифференцированной плотностью. Кроме того, ИТПСЧ может быть переведена из режима

интенсивной плавки в электромагнитных полях средней частоты с большим потреблением энергии в режим микширования и подогрева металла с малым потреблением энергии на токах низкой частоты. Реализация этих функций делает ИТПСЧ более гибким инструментом для получения точных и гомогенных сплавов.

Анализ потребительского рынка литейного оборудования показал, что индукционные плавильные системы должны быть глубоко диверсифицированы по производительности и специализированы для разных типов литейных производств. Для чугуно- и сталелитейных предприятий средней производительности (1–30 т/ч) наиболее рациональным считается типоряд ИТПСЧ вместимостью 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 16 т. Исходя из этого, предприятием «РЭЛТЕК» разработаны два модельных ряда ИТПСЧ вместимостью 1–4 и 6–16 т.

Индуктор печей первого модельного ряда выполнен из нескольких секций, навитых в разных направлениях из толстостенной медной трубы. Каждый виток катушки закреплен специальными установочными фиксаторами. Точное расположение витков и зазоров между витками позволяет исключить пробой изоляции и обеспечить ускоренную сушку при замене футеровки. Вокруг индуктора установлены водоохлаждаемые магнитопроводы, которые значительно снижают поля рассеяния и нагрев каркаса при энергонасыщенном режиме работы печи с большой удельной мощностью на индукторе (0,7–1,0 МВт/т). Благодаря нижнему подводу кабелей и шлангов доведены до минимума высота и другие габаритные размеры печи. Верхняя площадка печи в исходном положении снижает шум и защищает индуктор, подводы электроэнергии и воды от брызг металла. Крышка, футерованная огнеупорным материалом, прикрывает верхнюю часть тигля и поворачивается гидроприводом на время дозагрузки печи шихтой, что позволяет снизить тепловые потери печи. Подиумная часть печи выполнена из жаропрочного бетона, в центре которой установлен подиумный камень, позволяющий с помощью гидравлического толкателя удалить изношенную футеровку. Механизм удаления футеровки значительно ускоряет процесс замены футеровки печи. При разливке металла наклон печи осуществляется с помощью гидравлических цилиндров и самоустанавливающихся герметичных подшипников тяжелого режима работы.

Все перечисленные особенности конструктивного исполнения первого модельного ряда печей обеспечивают высокий коэффициент полезного действия (более 70%), удобство и надежность оперативного управления, сокращение времени и стоимости обслуживания.

Второй модельный ряд ИТПСЧ охватывает печи вместимостью от 6 до 16 т. Основные принципы построения конструкции этих печей

аналогичны рассмотренным выше. Отличительной особенностью исполнения данных печей является то, что в их конструкции введено устройство взвешивания тигля, что позволяет производить оценку количества металла в тигле. Данные о текущем количестве металла с учетом дозагрузки шихты на этапе плавки или с учетом остатка металла на этапе разливки необходимы для расчета и контроля температурного поля в рабочем объеме печи.

Другим конструктивным отличием печей второго модельного ряда является исполнение крышки, которая имеет гидравлический привод, обеспечивающий двусторонний ее наклон. При подъеме крышки вправо осуществляется механическая дозагрузка шихты с помощью наезжающей на верхний край тигля вибротележки, а при подъеме крышки влево производится наклон печи и разливка металла. Кроме того, в крышке имеются дымоотводящие каналы, с помощью которых производится дымоудаление при работе печи.

Технологические возможности и эффективность индукционной плавки в значительной мере определяются 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 секциях индуктора печи.

Стоимость системы электропитания ИТПСЧ составляет значительную долю в стоимости всего комплекса оборудования плавильной системы. При реализации изложенных выше требований к СЭП ее стоимость будет определяться установленной мощностью оборудования, сложностью схемного исполнения, уровнем программного обеспечения и другими факторами.

Перечисленные функциональные возможности позволяют достигать при непрерывной работе индукционного плавильного комплекса наибольшей производительности и требуемого качества металла. При этом в цикле работы ИТПСЧ проводятся не только интенсивная плавка металла, но и его технологическая обработка, легирование при активном перемешивании под воздействием низкочастотных электромагнитных полей, а также выдержка металла при заданной температуре. Эффективность капиталовложений (ЭК) при изготовлении, монтаже и вводе в действие индукционного плавильного комплекса может быть оценена обобщенным экономическим показателем:

$$ЭК = П / КЗ ,$$

где P – производительность плавильного комплекса, т/ч; $KЗ$ – капитальные затраты на изготовление, монтаж и наладку плавильного комплекса, руб.

В практике создания индукционных плавильных систем используются несколько схем электропитания с различным составом электрооборудования и разным количеством печей. На рис. 1 приведена функциональная схема СЭП однопостовой плавильной системы, которая состоит из устройства ввода высокого напряжения (УВН), силового трансформатора (Тр), преобразователя частоты (ПЧ), блока компенсирующих конденсаторов и печи (ИТПСЧ).

Поскольку печи работают в циклическом режиме с максимальным потреблением электроэнергии на этапе плавки металла или малым потреблением электроэнергии на этапе выдержки и разливки металла или вообще без потребления электроэнергии в технологических перерывах, то и общее потребление электроэнергии будет изменяться от максимального до минимального значения и, возможно, до полного его отсутствия. Следовательно, коэффициент использования оборудования (КИО) в такой плавильной системе существенно меньше единицы, а значит, невысоким получается и показатель ЭК.

Если требуется более высокая производительность плавильного участка, то устанавливается еще одна или несколько печей и вместе с ними пропорционально увеличивается количество каналов электропитания. В этом случае при многопостовой плавке печи работают независимо друг от друга и могут работать одновременно на полной мощности. Суммарная стоимость оборудования СЭП и производительность системы многопостовой независимой плавки возрастают пропорционально, а показатель ЭК не увеличивается.

Двухпостовая плавка металла может быть организована в системе с одним каналом электропитания. На рис. 2 показана функциональная схема СЭП системы двухпостовой tandemной плавки, в которой подключение печей к БК осуществляется через силовое переключающее устройство (СПУ), рассчитанное на полный ток печей. При поочередной работе ИТПСЧ1 и ИТПСЧ2 повышается КИО СЭП за счет сокращения ее проста в технологических паузах, однако производительность такой системы возрастает незначительно по сравнению с системой однопостовой плавки. Поэтому показатель эффективности капиталовложений этой системы с учетом стоимости СПУ мало отличается от ЭК системы однопостовой плавки.

Вариант исполнения системы двухпостовой tandemной плавки с одним каналом СЭП и дополнительным каналом электропитания малой мощности позволяет значительно (примерно на 20%) повысить его производительность. На рис. 3 приведена функциональная схема СЭП системы двухпостовой tandemной плавки с каналом электропитания малой мощности.

Повышение производительности в этой плавильной системе достигается за счет того, что основной канал СЭП работает на полной мощности, переключаясь на этапах плавки с одной печи на другую, с высоким КИО, близким к единице. На этапах выдержки и подогрева металла к печам подключается дополнительный канал электропитания малой мощности, состоящий из преобразователя частоты ПЧ2 и блока компенсирующих конденсаторов БК2. Установленная мощность оборудования вспомогательного канала электропитания составляет не более 10% от мощности основного канала. При этом и стоимость всей СЭП возрастает примерно на 10%. Следовательно, показатель ЭК данной плавильной системы возрастает не более чем на 10% по сравнению с предыдущим вариантом исполнения плавильной системы. Показатель эффективности капиталовложений возрастает еще больше в системе двухпостовой одновременной плавки с распределительной СЭП, функциональная схема которой приведена на рис. 4.



Рис. 1

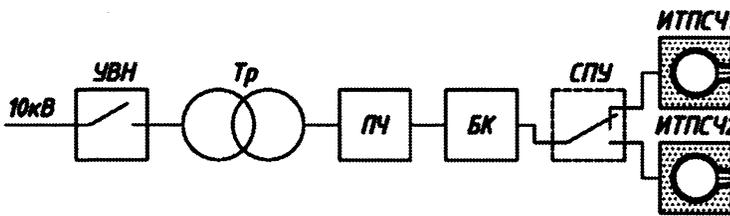


Рис. 2

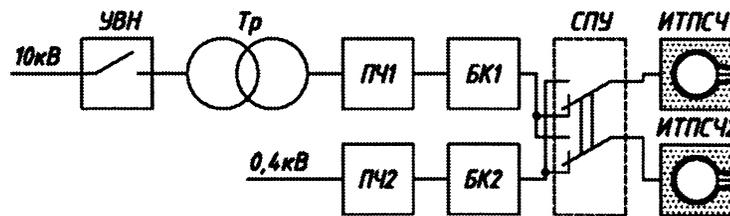


Рис. 3

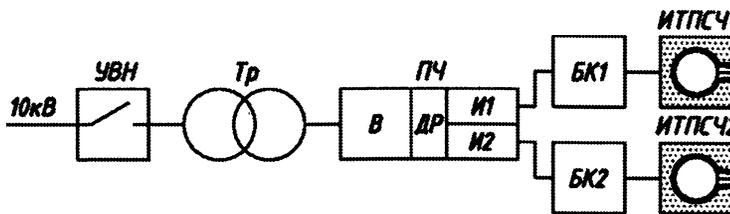


Рис. 4

Распределительная СЭП строится на основе мультиэнергоканального преобразователя частоты, в котором энергия подводится по одному каналу, а отводится по нескольким каналам с возможностью независимого плавного перераспределения потоков энергии по каждому из них. Функциональная схема СЭП (рис. 4) состоит из УВН, ТР, входной части ПЧ – выпрямителя (В) и дросселя (ДР), которые образуют входной энергетический канал, а выходные энергетические каналы ПЧ образованы инверторами И1, И2, выходы которых подключены к блокам компенсирующих конденсаторов БК1, БК2. В такой системе трансформаторное, выпрямленное и дроссельное оборудование ПЧ работают под постоянной нагрузкой с высоким КИО, а инверторное оборудование ПЧ и конденсаторы БК1, БК2 имеют циклическую нагрузку и относительно невысокий КИО. Значительным преимуществом данной СЭП является то, что в ней отсутствуют дорогое силовое переключающее устройство печей и связанные с ним затраты на обслуживание, а также исключены оперативные паузы в работе СЭП, необходимые для переключения СПУ.

В целом стоимость оборудования данной системы плавки возрастает не более чем на 8% по сравнению с системой однопостовой плавки, а ее производительность увеличивается на 20–25%. Следовательно, показатель ЭК повышается на 12–

15% и оказывается наибольшим из рассмотренных выше вариантов исполнения систем плавки.

Таким образом, наиболее эффективными следует считать системы однопостовой тандемной плавки с дополнительным каналом СЭП малой мощности и системы двухпостовой одновременной плавки с распределительной СЭП.

Предприятием ЗАО «РЭЛТЕК» освоено производство систем двухпостовой тандемной плавки серии УИП, характеристики которых приведены в табл. 1. В зависимости от требуемой производительности (почасовой или суточной) может быть выбрана установка индукционной плавки с печью определенной вместимости и соответствующим источником питания средней частоты.

Кроме того, предприятием ЗАО «РЭЛТЕК» производятся системы двухпостовой одновременной плавки с распределительной СЭП серии УИПД (установки индукционной плавки двухпостовые). Характеристики УИПД приведены в табл. 2. Из таблицы видно, что при одинаковой мощности источника питания производительность установок серии УИПД оказывается выше на 20–25%, чем производительность установок серии УИП, а показатель ЭК возрастает в установках УИПД на 15%. Выбор типа установки следует делать исходя из конкретных требований Заказчика и условий размещения оборудования на его производственных площадях.

Таблица 1. Параметры модельного ряда двухпостовых тандемных плавильных установок (УИП)

Параметры и производительность установки при однопостовой плавке чугуна	Вместимость печи, т							
	1	2	3	4	6	8	10	16
Почасовой темп плавки чугуна при технологических перерывах 20%, т/ч	1,15	1,72	2,62	3,80	5,33	8,15	8,31	16
Суточная производительность печи при 8-часовой работе, т/сут	9,2	13,8	21	30	42,6	65,2	66,5	128
Мощность источника питания, кВт	800	1200	1800	2600	3600	5400	5400	10000
Расход электроэнергии на плавку 1 т чугуна, кВт·ч/т	560	560	550	550	540	530	520	500
Напряжение / частота на индукторе печи, кВ/кГц	1,0/1,0	1,5/0,5	1,8/0,25	1,8/0,25	1,8/0,25	3,0/0,25	3,0/0,25	3,0/0,25

Таблица 2. Параметры модельного ряда двухпостовых плавильных установок (УИПД) с распределительной СЭП

Параметры и производительность УИПД при двухпостовой плавке чугуна	Вместимость печи, т							
	1	2	3	4	6	8	10	16
Почасовой темп плавки чугуна при технологических перерывах, т/ч	2,8	4,1	6,0	6,9	9,26	12,8	20	30
Суточная производительность печи при 8-часовой работе, т/сут	22,4	32,8	48	55,2	74	102,4	160	240
Суммарная мощность источника питания, кВт	1800	2600	3600	4200	5400	7200	11000	16000
Расход электроэнергии на плавку 1 т чугуна, кВт·ч/т	560	560	550	550	540	530	520	500
Напряжение / частота на индукторе печи, кВ/кГц	1,0/1,0	1,5/0,5	1,8/0,25	1,8/0,25	1,8/0,25	3,0/0,25	3,0/0,25	3,0/0,25

На рис. 5 показаны циклограммы работы двухпостового плавильного комплекса с печами вместимостью 10 т (M_1, M_2) и общей мощностью источника питания 11 МВт. В цикле работы каждой печи активная мощность (P_1, P_2) изменяется от 1,0 до 10 МВт. Однако за счет фазового сдвига графиков потребления электроэнергии в технологическом цикле работы печей достигается стабилизация общего потребления электроэнергии на уровне $\Sigma P=11$ 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/ч, что вполне приемлемо при замене большинства не соответствующих экологическим нормам вагранок, работающих на коксе.

Вместе с поставкой всего комплекса оборудования плавильной установки заказчику предлагается типовая планировка размещения оборудования на плавильном участке. На рис. 6 приведена планировка наиболее рационального двухуровневого размещения оборудования, позволяющая свести к минимуму потери электроэнергии, обеспечить надежность и долговечность работы оборудования, сделать удобным и безопасным выполнение всех технологических операций.

В состав установок УИП и УИПД входят две индукционные печи, один или два блока компенсации реактивной мощности индукторов печей, преобразователь частоты, силовой трансформатор, устройство ввода высокого напряжения с защитным выключателем, загрузочные вибротележки, станция двухконтурного охлаждения (типа «вода-вода»), гидравлическая система управления печами, пульта управления печами и центральный пульт управления установкой.

Плавильные установки снабжены цифровыми системами управления. Контроль процесса плавки обеспечивается компьютерной системой, осуществляю-

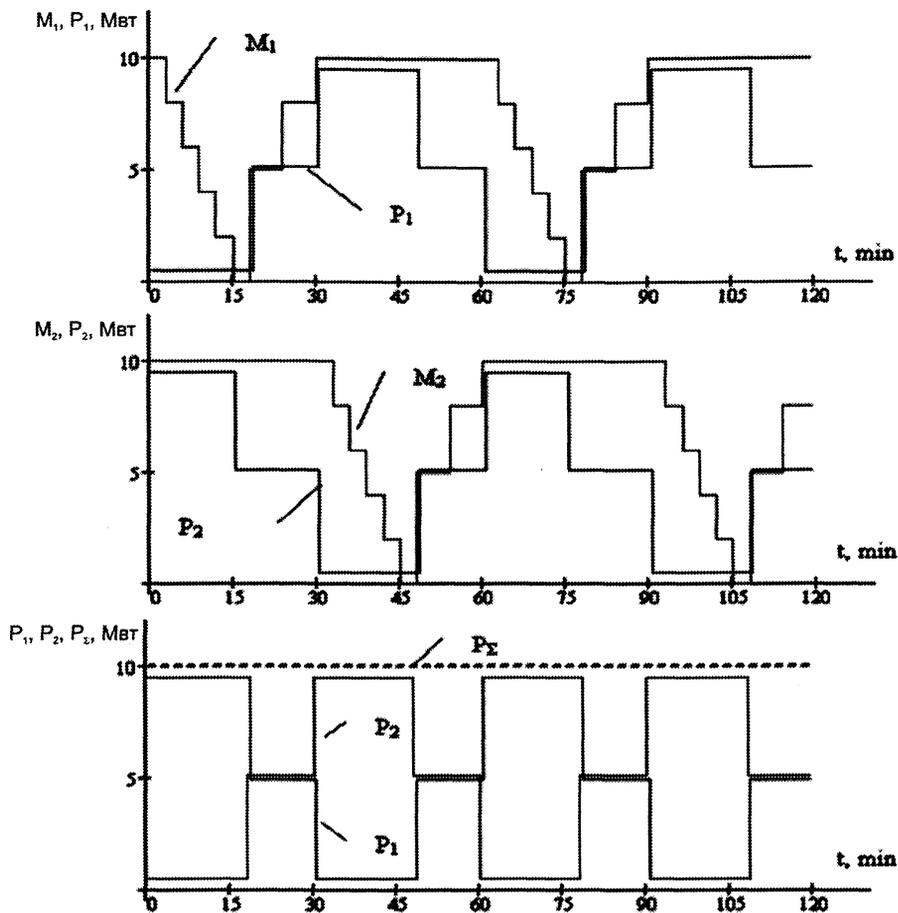


Рис. 5

щей рациональную стыковку всех видов технологических операций. Пример отображения режимов работы приведен на рис. 7. Использование таких систем управления позволяет снизить напряженность труда, повысить информативность процесса плавки и увеличить производственную надежность индукционных плавильных установок. Применение гибких индукционных систем плавки металлов с

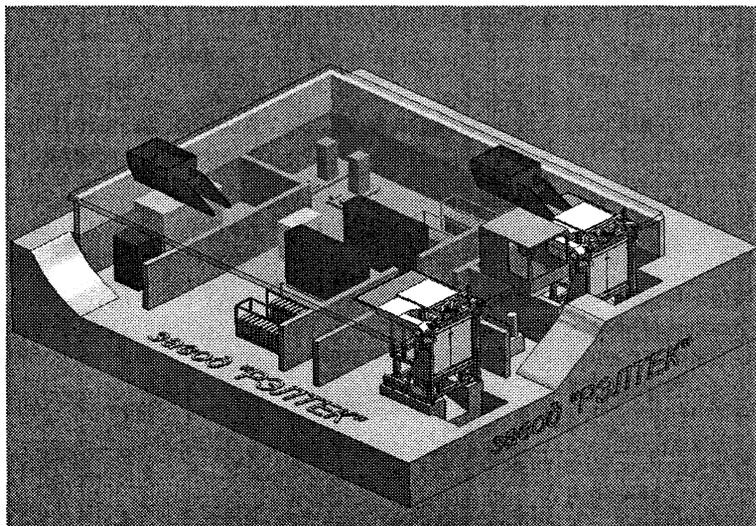


Рис. 6



Рис. 7

широкими функциональными возможностями открывает новые перспективы повышения эффективности и качества металлургических процессов в литейных производствах.

Индукционные системы среднечастотной плавки металлов широко внедряются на предприятиях России и зарубежных стран. По своим техническим характеристикам они не уступают, а по ряду показателей превосходят аналогичные системы Западно-Европейских фирм (ABB, Junker, Eges) и фирм США (Inductotherm).