

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ ИНДУКЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ СРЕДНЕЧАСТОТНОЙ МНОГОПОСТОВОЙ ПЛАВКИ МЕТАЛЛОВ С ПЕЧАМИ ВМЕСТИМОСТЬЮ ОТ 1 ДО 16 ТОНН

В.И. Лузгин, А.Ю. Петров, С.А. Рачков, К.В. Якушев
(Российская электротехнологическая компания, г. Екатеринбург, РОССИЯ)

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, мазутные и газовые вагранки (72%), индукционные печи промышленной частоты (23%) и дуговые печи (5%), которые в ближайшие годы необходимо заменить 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 порционном режиме без остатка металла ("болота") с короткими циклами плавки (40-45 минут), 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, должны 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, т.к. они имеют крайне низкий угар элементов и обеспечивают интенсивное перемешивание металла. Кроме этого, ИТПСЧ наиболее экономичны, экологичны и значительно улучшают условия труда на плавильных участках литейных предприятий

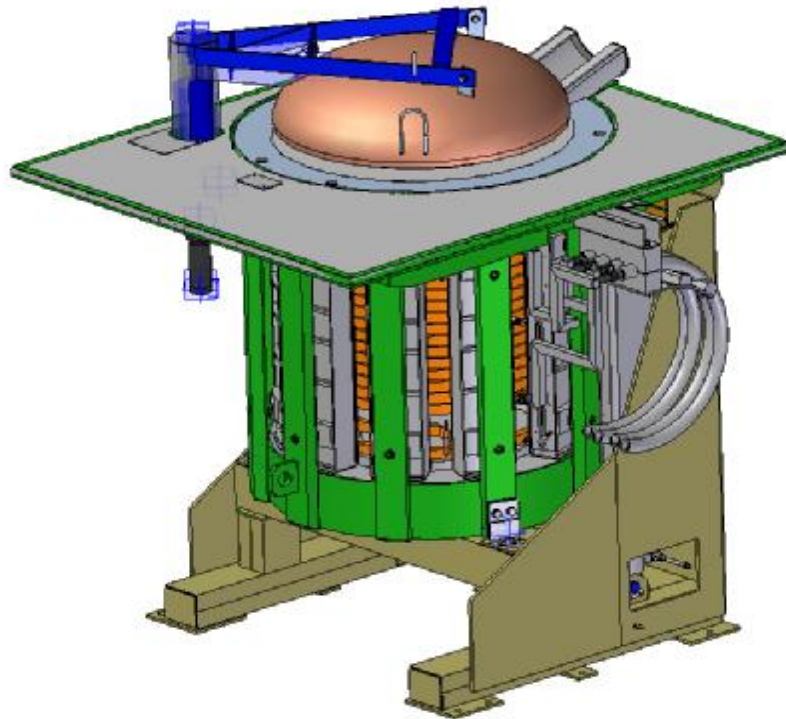
Индукционные тигельные печи промышленной частоты (ИТППЧ) имеют низкую технологическую эффективность, что связано с малой интенсивностью процесса плавки при удельных мощностях 350-400 кВт на одну тонну металла и с большим расходом электроэнергии на тонну выплавляемого металла (более 600 кВт час/т). Кроме этого, ИТППЧ работают с "болотом", 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 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 этого, 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 однородных 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/час) наиболее рациональным считается типоряд ИТПСЧ вместимостью 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 16 тонн. Исходя из этого, предприятием "РЭЛТЕК" разработаны два модельных ряда ИТПСЧ вместимостью 1÷4 т и 6÷16 т.

Конструктивная схема печей первого модельного ряда приведена на рис. 1. Индуктор таких печей 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.

а

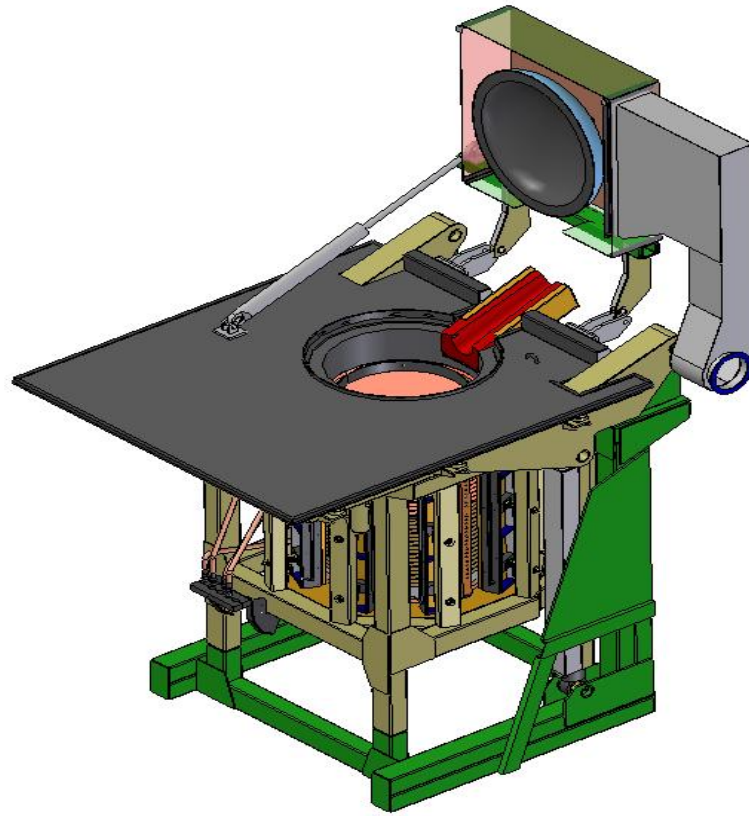


б



Рис. 1

а



б



Рис. 2

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 тонн. На рис. 2 представлена конструктивная схема печей этого ряда. 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 разлива 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 двухсторонний 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 разлива металла. Кроме этого, в крышке имеются дымоотводящие каналы, с помощью которых производится дымоудаление при работе печи.

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 секциях индуктора печи. На рис. 3 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 формирования двухчастотного тока индуктора. Во втором режиме среднечастотная составляющая тока индуктора 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 модуляции 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.

Системы электропитания двухпостовой индукционной плавильной установки

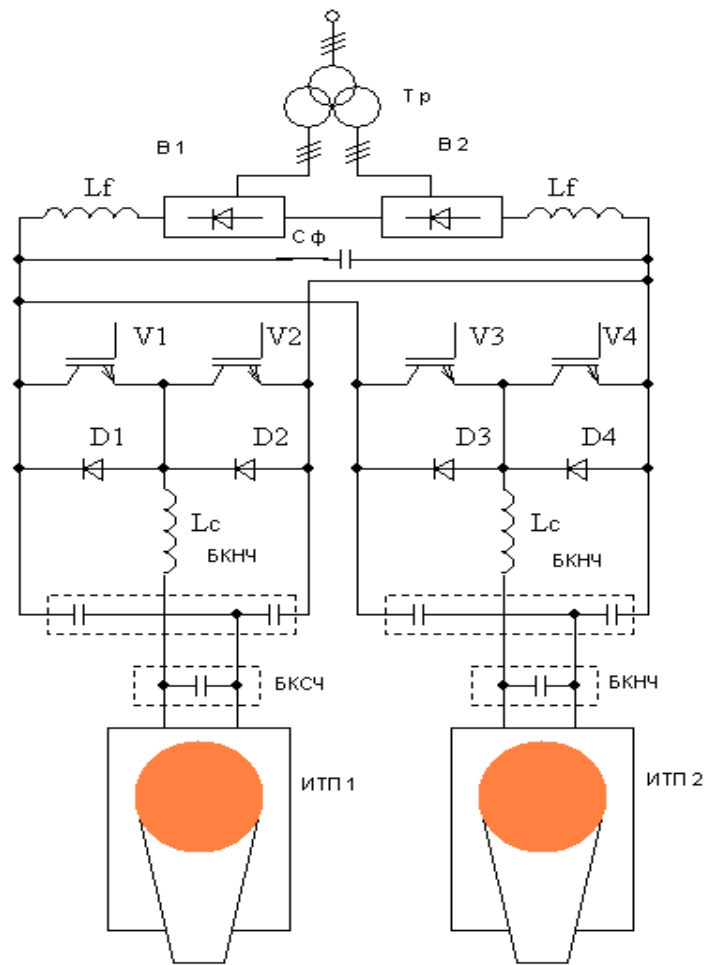


Рис. 3

Диаграмма напряжения и тока в индукторе плавильной печи (менять местами)

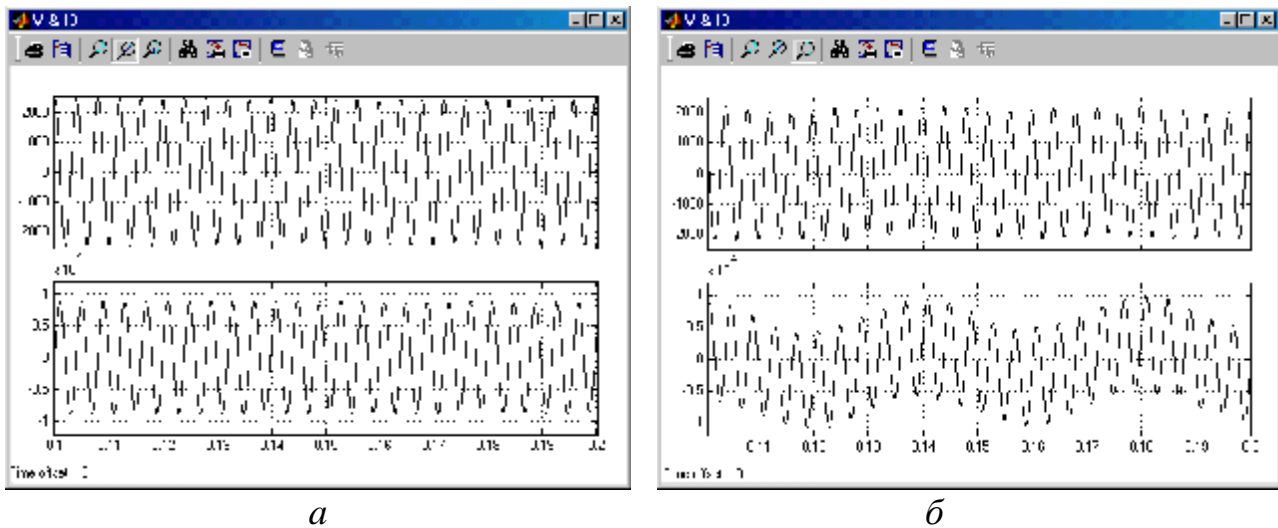


Рис. 4

Изменением частоты управления и глубины широтной модуляции управляющих сигналов, подаваемых на вентили инверторов, обеспечивается независимое управление среднечастотной и низкочастотной составляющей тока индуктора, что позволяет осуществлять глубокое регулирование параметров электромагнитного поля в рабочих объемах индукционных печей. На рис. 4, а приведены диаграммы напряжения и тока в индукторе в режиме одночастотного возбуждения нагрузочного контура на этапе интенсивного нагрева и плавки металла, а на рис. 4, б показаны эти же диаграммы в режиме двухчастотного формирования тока индуктора на этапе подогрева и микширования металла.

В последнем случае среднечастотный ток индуктора модулирован низкочастотной составляющей, возбуждающей электромагнитное поле в глубинных 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.5 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 значительную часть составляет стружка металла или высечка от листообработки. При этом повышение мощности в нижней секции индуктора 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 индуктора удастся активизировать химические процессы взаимодействия металла и шлака за счет подогрева последнего до более высокой температуры и активизации конвективных потоков металла под шлаком.

Система электропитания двухпостового двухчастотного индукционного плавильного комплекса с зонной фокусировкой мощности в рабочих объемах печей

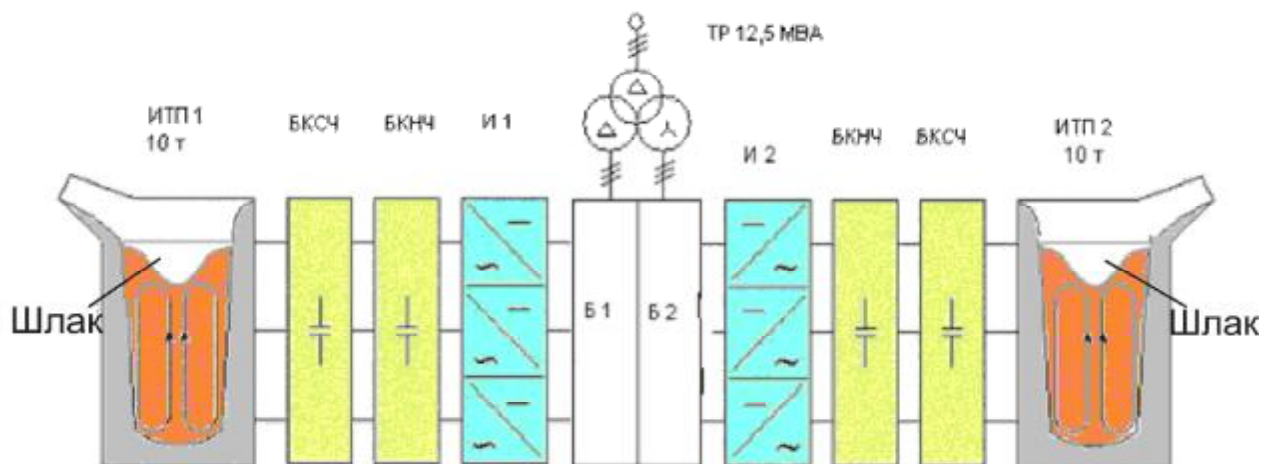


Рис.5

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 энергосистемой 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.

Предприятием "РЭЛТЕК" разработана конструкция и освоено производство многоэнергочанальных преобразователей частоты серии ТПЧД мощностью $0,8 \div 16$ МВт, частотой $0,15 \div 1,0$ кГц для питания индукционных печей. На

рис. 6 представлена конструкция двухэнергочанального преобразователя частоты мощностью 3,6 МВт, частотой 0,25 кГц, состоящего из трех модулей, два из которых собраны по трехфазной мостовой схеме выпрямителя с фильтровыми дросселями в цепи постоянного тока, а третий – по двухячейковой схеме инвертора тока, имеющего два энергетических выхода. Оба выпрямительных модуля подключаются по входу к 6-ти фазной сети промышленной частоты, а их выходы объединены на шинах постоянного тока. Таким образом, звено постоянного тока преобразователя собрано на двух выпрямительных модулях по 12-тифазной схеме выпрямления и является источником питания двух инверторных ячеек, каждая из которых преобразует энергию постоянного тока в энергию тока средней частоты и управляет потоком энергии, подводимой к индуктору печи.

Управление преобразователями частоты осуществляется цифровыми системами, собранными на базе программируемых контроллеров ATMEGA и программируемой логики ALTERA.

а



б



Рис.6

Индукционные печи, система электропитания, вспомогательное оборудование, а также центральный пульт управления образуют комплекс оборудования для индукционной среднечастотной плавки металлов. В таблице 1 приведены параметры модельного ряда однопостовых индукционных плавильных установок серии УИП, выпускаемых заводом "РЭЛТЕК", по которой в зависимости от требуемой производительности (почасовой или суточной) может быть выбрана установка с печью определенной вместимости и соответствующим источником питания средней частоты.

Весьма важную роль в определении эффективности той или иной плавильной системы играет соотношение производительности и установленной мощности оборудования. Это соотношение существенно влияет на себестоимость 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]. На рис. 7 представлены циклограммы работы двухпостового плавильного комплекса с печами 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 $\sum P = 11$ 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.

Системы среднечастотной двухпостовой плавки металлов наиболее экономически выгодны с точки зрения эффективности использования капиталовложений при заданной производительности. Поэтому Российской электротехнологической компанией разработан и производится модельный ряд двухпостовых плавильных установок серии УИПД, параметры которых приведены в таблице 2. В зависимости от требуемой производительности (по часовой или суточной) выбирается тип установки, которому соответствуют печи определенной вместимости и суммарная мощность системы электропитания.

Вместе с поставкой всего комплекса оборудования плавильной установки заказчику предлагается типовая планировка размещения оборудования на плавильном участке. На рис. 8 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.

Таблица параметров модельного ряда однопостовых плавильных установок (УИП)

Параметры и производительность установки при однопостовой плавке чугуна	Вместительность печи, т							
	1	2	3	4	6	8	10	16
Почасовой темп плавки чугуна при технологически перерывах 20%, т/час	1,15	1,72	2,62	3,80	5,33	8,15	8,31	16
Суточная производительность печи при 8-ми часовой работе, т/сутки	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 тонны чугуна, кВтч/т	560	560	550	550	540	530	520	500
Напряжение и 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)

Параметры и производительность УИПД при двухпостовой плавке чугуна	Вместительность печи, т							
	1	2	3	4	6	8	10	16
Почасовой темп плавки чугуна при технологически перерывах, т/час	2,8	4,1	6,0	6,9	9,26	12,8	20	30
Суточная производительность печи при 8-ми часовой работе, т/сутки	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 тонны чугуна, кВтч/т	560	560	550	550	540	530	520	500
Напряжение и 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	3,0/0,15

**Циклограммы работы двухпостовой индукционной плавильной
установки с печами вместимостью 10 тонн и общей
мощностью 11 МВт**

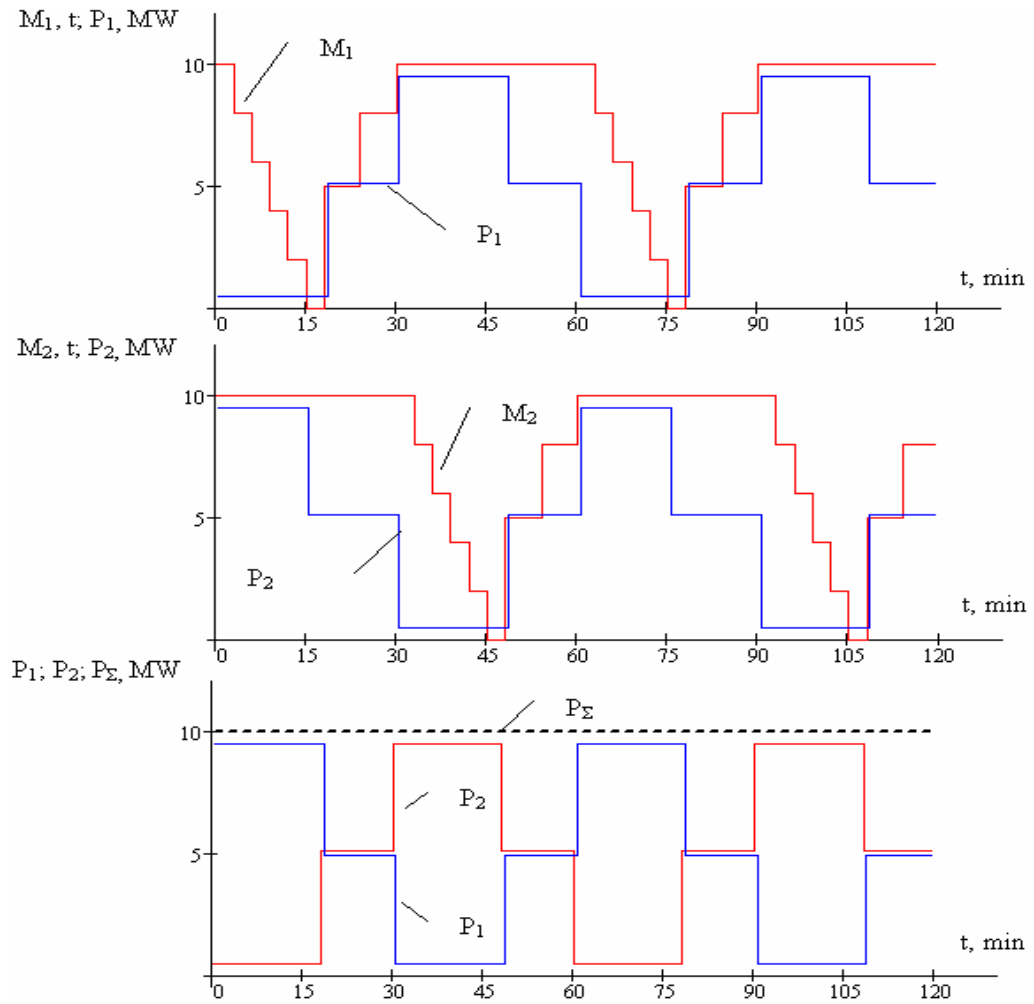


Рис. 7

Типовая планировка двухпостовых индукционных плавильных установок с печами вместимостью 1-16 тонн



Рис. 8

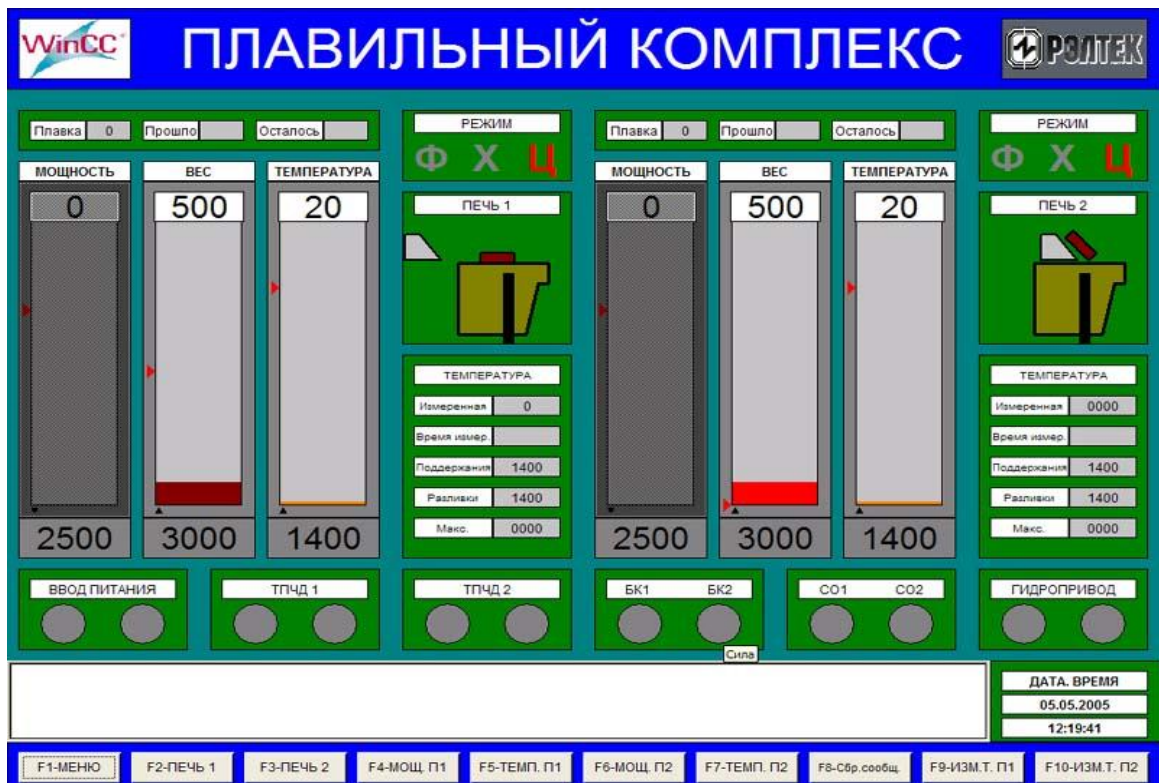


Рис. 9

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

Плавильные установки снабжены цифровыми системами управления. Контроль процесса плавки обеспечивается компьютерной системой, осуществляющей рациональную стыковку всех видов технологических операций. Пример отображения режимов работы приведен на рис. 9. 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 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).