

## СТАТИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ЖИДКОЙ СТАЛИ

Васильев А. В. (Рыбница, Молдавский металлургический завод),  
Грачёв В. Г. (Москва, ЗАО «ЭМТ»),  
Кузькин В. И., Мелешкин В. Н., Шипаева С. Н., Симоненков Д. В.  
(Москва, Всероссийский электротехнический институт)

В статье изложены результаты исследований и разработки статического преобразователя частоты (СПЧ) для электромагнитного перемешивания (ЭМП) жидкой стали в процессе непрерывного литья заготовок. Указанная технология повышает качество заготовок за счёт уменьшения поверхностных дефектов, неметаллических включений и газовых пузырей, более равномерного распределения пористости, увеличения зоны мелкозернистой структуры и т. п.

Устройство для ЭМП представляет собой погружную электрическую машину переменного тока с водяным охлаждением, которая реализована в виде четырёхполюсного статора с двухфазными обмотками и короткозамкнутого ротора, роль которого играет разливаемый жидкий металл. Упомянутый статор размещается внутри корпуса кристаллизатора – в так называемой зоне кристаллизации металла, что упрощает конструкцию, снижает её стоимость и уменьшает потребление электроэнергии. Описываемое устройство защищено патентами Российской Федерации (№ 2150776 от 21.05.99 и № 2160177 от 21.10.99).

Для создания кругового магнитного поля в кристаллизаторе необходимо обеспечить питание обмоток статора от двухфазного источника гармонического тока с регулируемой амплитудой (30...350 А) и частотой (1...15 Гц). При этом следует учесть, что электрические параметры обмоток статора являются нелинейными

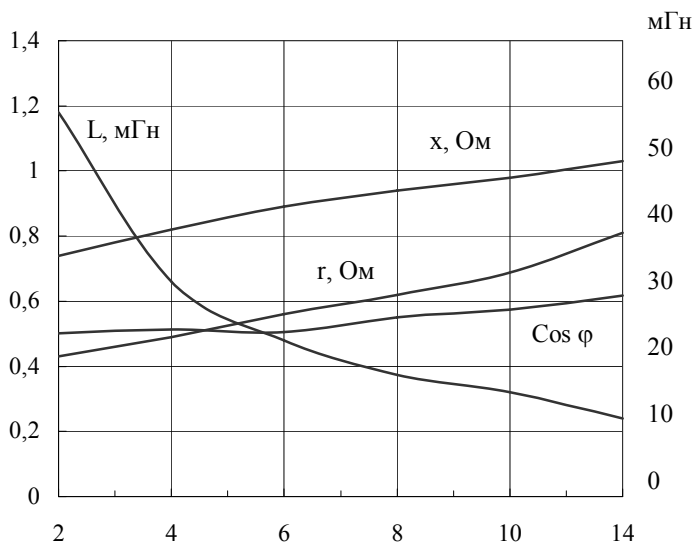


Рис. 1

функциями частоты (рис.1). Как видно, в диапазоне частот от 2 до 14 Гц активное и реактивное сопротивления обмотки изменяются в 1,5 – 2 раза, а индуктивность – почти в 5 раз. Заметим также, что коэффициент мощности обмотки в этих условиях изменяется незначительно и не превышает 0,62.

В качестве такого источника предложено использовать СПЧ, в состав которого входят мостовой выпрямитель, выполненный на трёх полумостовых диодно-тиристорных модулях типа SKKH

162/12 E (фирма SEMIKRON) со сглаживающим LC-фильтром, и двухфазный инвертор напряжения на IGBT-модулях, состоящий из двух мостовых однофазных инверторов типа SkiiP 432 GH 120 (фирма SEMIKRON).

Питание СПЧ осуществляется от промышленной трёхфазной сети напряжением 380 В (частота 50 Гц). Диодно-тиристорный выпрямитель наряду с основной своей функцией обеспечивает предварительный заряд конденсаторов LC-фильтра ограниченным током, а LC-фильтр осуществляет сглаживание пульсаций выпрямленного напряжения.

Выходные напряжения СПЧ формируются по принципу широтно-импульсной модуляции (ШИМ) постоянного напряжения. Избранный алгоритм управления силовыми ключами двухфазного инвертора представлен следующей таблицей.

ШИМ-функции управления	Интервалы на периоде основной гармоники напряжения			
	$0 < \omega t < \pi/2$	$\pi/2 < \omega t < \pi$	$\pi < \omega t < 3\pi/2$	$3\pi/2 < \omega t < 2\pi$
$\gamma_1(\omega t)$	$m \sin \omega t$	$1$	$1 + m \sin \omega t$	$0$
$\gamma_2(\omega t)$	$0$	$1 - m \sin \omega t$	$1$	$- m \sin \omega t$
$\gamma_3(\omega t)$	$0$	$- m \cos \omega t$	$1$	$1 - m \cos \omega t$
$\gamma_4(\omega t)$	$m \cos \omega t$	$0$	$1 + m \cos \omega t$	$1$

Как видно, период основной гармоники выходного напряжения инвертора разбит на четыре равных временных интервала, в каждом из которых только два полумоста переключаются с частотой модуляции (2 кГц), а два других находятся в статическом состоянии. При этом изменение амплитуды (и действующего значения) напряжения осуществляется вариацией коэффициента модуляции ( $0 < m < 1$ ). Такой алгоритм обеспечивает равномерное распределение статических и динамических потерь в IGBT-модулях и позволяет эффективно использовать напряжение питающей сети – максимальный коэффициент передачи СПЧ от входа к выходу составляет не менее 0,95.

Рассмотренный алгоритм реализуется системой автоматического регулирования тока, блок-схема которой изображена на рис. 2.

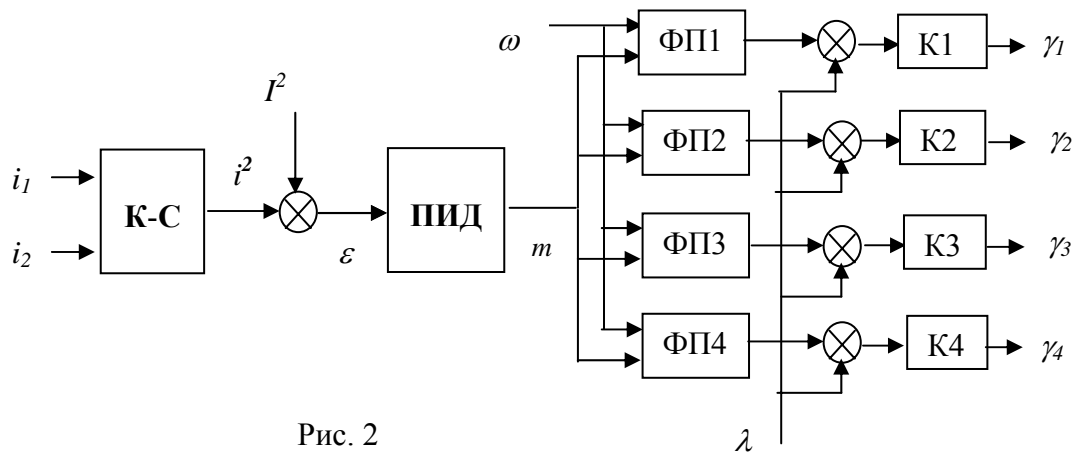


Рис. 2

Мгновенные значения токов ( $i_1$  и  $i_2$ ) в обмотках статора, используемые в роли сигналов обратной связи, поступают на вход квадратора-сумматора (К-С), который преобразует их в квадрат тока по следующей формуле:

$$i^2 = \frac{1}{2} [i_1^2(t) + i_2^2(t)].$$

Полученный результат примечателен тем, что такой сигнал пропорционален мгновенной мощности симметричной двухфазной нагрузки, которая, как известно,

представляет собой неизменную во времени величину, и потому наиболее предпочтителен в качестве обобщенного сигнала обратной связи как квадрат действующего значения тока, ибо практически не требует специальной фильтрации.

В схеме сравнения мгновенное значение квадрата тока вычитается из квадрата токовой уставки ( $I^2$ ), а сигнал рассогласования ( $\varepsilon$ ) поступает в ПИД-регулятор, на выходе которого формируется сигнал ( $m$ ), соответствующий коэффициенту модуляции. Этот сигнал наряду с уставкой частоты ( $\omega$ ) подается на входы функциональных преобразователей (ФП1...ФП4), которые формируют указанные в таблице временные зависимости  $\gamma_1(\omega t)$ ...  $\gamma_4(\omega t)$ . Полученные зависимости сравниваются с опорным сигналом ( $\lambda$ ) пилообразной формы и посредством компараторов (К1...К4) превращаются в управляющие ШИМ-импульсы ( $\gamma_1$ ... $\gamma_4$ ), поступающие на силовые ключи.

Таким образом система управления СПЧ обеспечивает независимое и раздельное задание частоты и амплитуды с обратной связью по току, а также реализует требуемый набор всевозможных защитных функций, в том числе контроль температуры, сопротивления изоляции и прочие. Кроме того, предусматривается местное и дистанционное управление СПЧ, включая обмен служебной информацией по сети PROFIBUS-DP посредством контроллера SIMATIC (фирма Siemens), диагностику и настройку технологических параметров с использованием внешнего компьютера.

Компьютерное моделирование электромагнитных процессов в СПЧ подтвердило достоверность предложенных схемотехнических решений и алгоритмов функционирования. Модель создана на базе программы Capture Orcad v.9.1, расчеты выполнены средствами Pspice v.9.1. В процессе моделирования исследованы наиболее характерные установившиеся и переходные режимы СПЧ, при этом статор ЭМП был представлен в модели эквивалентной активно-индуктивной нагрузкой.

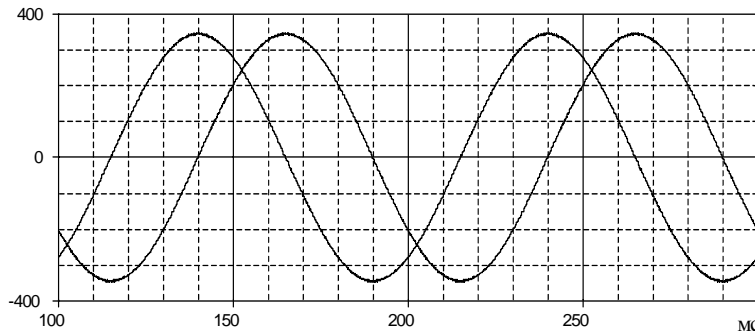


Рис. 3

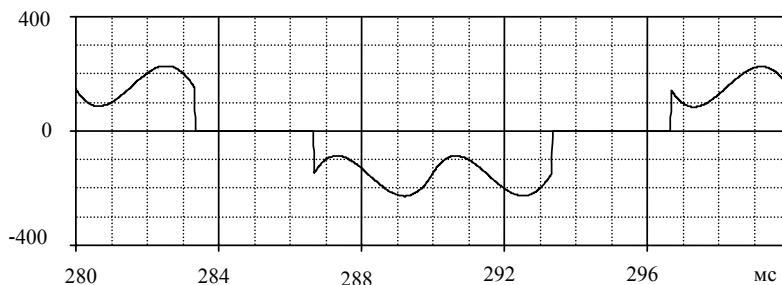


Рис. 4

В качестве примера на рис. 3 изображены временные диаграммы линейных токов (частота 10 Гц, амплитуда 350 А) на выходе СПЧ в установившемся режиме (при напряжении сети 420 В). Как видно, они действительно образуют симметричную двухфазную систему.

Обобщая результаты моделирования установившихся режимов, можно утверждать, что выходные токи СПЧ практически синусоидальны (коэффициент гармоник не более 3%), а действующее значение токов поддерживается с

точностью до 3%.

Представляет интерес и временная диаграмма одного из линейных токов на входе СПЧ, полученная при тех же условиях и приведенная на рис. 4. Анализ этой диаграммы показывает, что действующее значение входного тока оказывается рав-

ным 135 А и, следовательно, полная мощность на входе СПЧ составляет около 98 кВА, а активная мощность при этом равна 89 кВт.

Моделирование переходных процессов в СПЧ показало, что при скачкообразных изменениях входного напряжения и уставки выходного тока они имеют апериодический характер и заканчиваются не более чем за период основной гармоники вы-

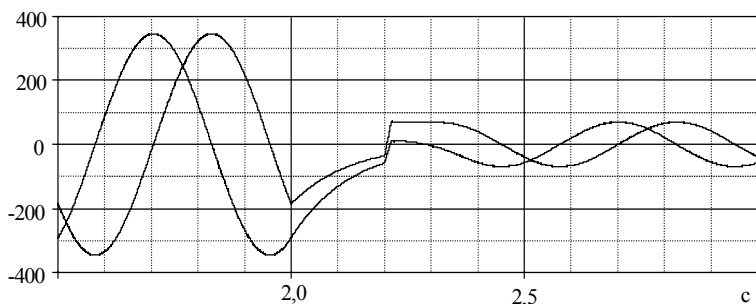


Рис. 5

ходного напряжения. Примером здесь может служить рис. 5, где показаны линейные токи на выходе СПЧ в переходном процессе, связанном со скачкообразным изменением уставки тока с 250 до 50 А (выходная частота 2 Гц, напряжение сети 362 В).

Обстоятельное компьютерное моделирование силовых цепей и системы регулирования СПЧ позволило исключить из процесса разработки этап физического макетирования и перейти непосредственно к созданию конструкторской документации на опытный образец с последующим изготовлением установочной партии.

Конструктивно СПЧ оформлен в виде шкафа (ширина – 830 мм, высота – 1700 мм и глубина – 485 мм, класс защиты IP32) с естественным охлаждением и односторонним обслуживанием. В нижней части шкафа размещены клеммные колодки для подключения питающей сети и обмоток статора, а также сетевой радиодофильтр.

В средней части шкафа расположены автоматические выключатели DPX-250 и DPX-400 (фирма Legrand), а также датчики тока для контроля изоляции. В глубине размещены два силовых модуля SKiiP в комплекте с вентиляторами типа GD-133-2A (фирма SEMIKRON) и конденсаторы типа B43456-3300мкФ-400В (фирма EPCOS), входящие в состав LC-фильтра. Модули SKKH установлены на охладителе, который расположен в верхней части шкафа – в воздушном потоке упомянутых вентиляторов. Рядом с выпрямительными модулями находятся дроссели LC-фильтра и датчик тока LT-300-S/P2 (фирма ТвЕЛЕМ). Кроме того, в верхней части шкафа размещены печатные платы (микропроцессорная система управления, вторичный источник питания и прочие), а также интерфейсные разъёмы RS-232 и RS-485 для подключения внешних устройств. Спереди на двери шкафа смонтирован пульт местного управления с двухстрочным жидкокристаллическим дисплеем и пленочной клавиатурой.

Опытные образцы СПЧ, изготовленные в ЗАО «ЭЛСИЭЛ», прошли этап наладки, а затем подвергнуты контрольным испытаниям с последующей наработкой на реальную нагрузку (статоры ЭМП, погружённые в воду).

В ходе наладки и испытаний СПЧ были сняты осциллограммы токов и напряжений, причём как в установившихся, так и в переходных режимах. На рис. 6 приведена осциллограмма токов в обмотках статора ЭМП (действующее значение 150 А, частота 8 Гц). Очевидно, что токи имеют одинаковые амплитуды и сдвинуты

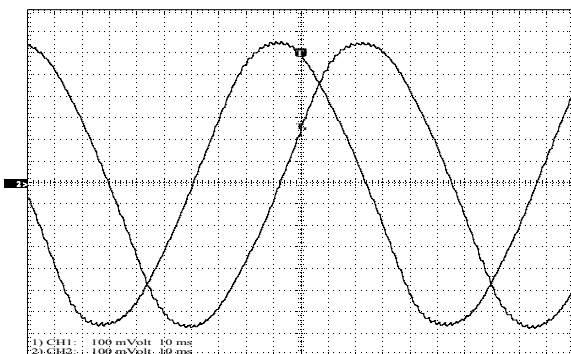


Рис. 6

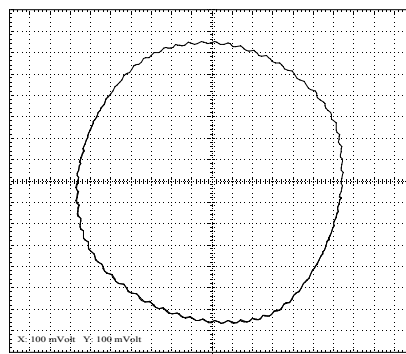


Рис. 7

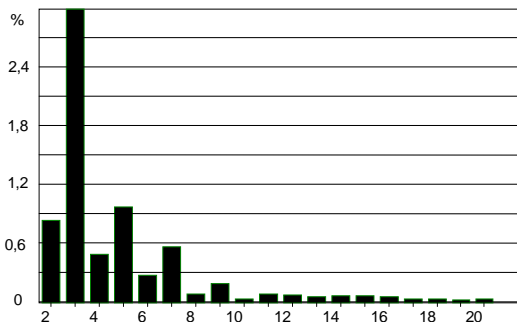


Рис. 8

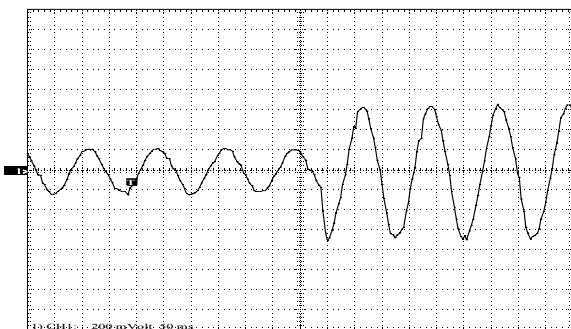


Рис. 9

во времени на четверть периода. Однако годограф этих токов, изображённый на рис. 7, несколько отличается от ожидаемой окружности: здесь становятся заметными не только коммутационные пульсации (2 кГц), но и гармоники, кратные основной (8 Гц). Об этом же свидетельствует и приведенный на рис. 8 частотный спектр одного из рассматриваемых токов. Как видно, амплитуды 3-ей, 5-ой и 7-ой гармоник составляют соответственно 3, 1 и 0,5% от амплитуды основной гармоники тока. Однако

в целом содержание высших гармоник таково, что коэффициент несинусоидальности тока в обмотках статора не превышает допустимых 5%.

О качестве переходных процессов в системе СПЧ-ЭМП можно судить по осциллограмме тока в одной из обмоток статора, приведенной на рис. 9 (масштабы: 70 А/кл, 50 мс/кл). Как видно, скачкообразное изменение уставки тока от 50 до 150 А отрабатывается системой

регулирования менее чем за 50 мс, причём переходный процесс имеет аperiodический характер.

В целом по результатам наладки, испытаний и наработки опытных образцов СПЧ было сделано заключение о том, что все они соответствуют заявленным техническим требованиям. С учётом этого в сентябре 2001 года установочная партия СПЧ (в количестве 7 образцов) была передана Молдавскому металлургическому заводу.