

## **ФОРМИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ИНДУКЦИОННОЙ ТИГЕЛЬНОЙ ПЕЧИ С ГРАФИТОВЫМ ТИГЛЕМ**

В.И. Лузгин, А.Ю. Петров, Ф.Н. Сарапулов, С.Ф. Сарапулов  
Уральский государственный технический университет, ЗАО «РЭЛТЕК»,  
Россия, г. Екатеринбург

В практике обработки цветных металлов заводы ОЦМ используют индукционные тигельные печи при плавке относительно небольших количеств металла для получения отливок до 500 кг, производства лигатур и т.п.. Как правило, это сложные сплавы, имеющие состав металлов с различной плотностью и сильно выраженным эффектом ликвации при плавке, а также обладающие высокой электропроводностью. Для повышения эффективности плавки таких металлов в индукционных печах используются для повышения электрического КПД графитовые тигли, в которых индуцируется высокочастотный ток и осуществляется косвенный разогрев металла. Однако экранирующее действие графитового тигля резко снижает электродинамические силы, действующие на расплав металла, и как следствие, становится недостаточным перемешивание металла, возникает локальный перегрев металла у стенок тигля, и не достигается требуемая однородность расплава металла.

Для формирования эффективных режимов работы индукционной тигельной печи с графитовым тиглем требуется при ограниченной плотности тока в проводе индуктора (до 20 А/мм<sup>2</sup>) передать в загрузку и проводящий тигель наибольшую активную мощность на стадии нагрева шихты и обеспечить интенсивное перемешивание расплава на последующем этапе плавки. Это осуществляется при помощи совместного двухчастотного или разночастотного по времени питания индуктора от специального полупроводникового преобразователя частоты [1].

Следует иметь в виду два обстоятельства. Во-первых, с изменением частоты тока изменяется глубина проникновения поля в стенку водоохлаждаемой трубки провода, поэтому толщина стенки выбирается по высокой частоте. Естественно, что при этом сечение провода на низкой частоте оказывается вынужденно нерациональным. С другой стороны, для интенсивного перемешивания расплава на низкой частоте требуется питание обмотки многофазной системой токов. Это, в свою очередь, ведет к усложнению источника питания, а также определенным конструктивным трудностям в исполнении многосекционного индуктора [2].

Далее приведены некоторые результаты численных исследований индукционной тигельной печи (ИТП) для меди с графитовым тиглем типа ТГГ-500, внутренним диаметром индуктора 0.6 м, его высотой 0.75 м, толщиной стенки провода 3 мм и его высотой 0.032 м.

Исследования проводились при помощи математической модели на основе детализированных схем замещения [3]. Область существования магнитного поля ИТП разбивается на слои по радиусу (в нашем случае 25 слоев с различными электрическими и магнитными свойствами) и на участки (кольца) по оси (в рассматриваемых вариантах 12 участков в зоне индуктора и по 12 участков в краевых зонах сверху и снизу индуктора). Вводятся электрическая для обмотки индуктора и магнитная схемы замещения с детализацией до витка индуктора и выделенного участка (кольца) области электромагнитного поля. Записываются уравнения электрического состояния для обмотки и магнитного состояния для магнитной схемы замещения. Решение полученной системы уравнений позволяет найти составляющие магнитной индукции, плотности тока, удельные осевые и радиальные усилия, удельные мощности на каждом участке магнитной схемы замещения. Затем определяются интегральные характеристики ИТП: напряжение, потребляемая и электромагнитная мощности, суммарные осевое и радиальное усилия, действующие на слои загрузки и проводящего тигля.

Схема соединения обмотки определяет структуру обмоточной матрицы, задающей распределение МДС по высоте индуктора. Предусмотрено задание любой схемы соединения витков или секций обмотки индуктора. Пример задания однофазной и трехфазной обмоток показан на рис.1.

		ВИТКИ												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
$KF^T =$	1	1	1	0	0	0	0	-1	-1	0	0	0	0	фазы
	2	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	-1	-1	
	3	0	0	-1	-1	0	0	0	0	1	1	0	0	
		ВИТКИ												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
$KF^T =$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	фазы
	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Рис.1. Обмоточные матрицы при трехфазном (а) и однофазном (б) питании

Внешние радиусы выделенных слоев показаны на рис. 2. Приняты следующие обозначения:  $D_{vn}$  и  $D_{vh}$  – внутренний и внешний диаметры индуктора,  $b_s$  – толщина стенки провода. Удельные электропроводности меди провода, материала тигля и расплава соответственно равны  $56 \cdot 10^6$ ,  $6.67 \cdot 10^4$  и  $4.76 \cdot 10^6$ , относительная магнитная проницаемость сердечников во втором слое – 100.

$$r = \left( \frac{D_{vh}}{2} + 0.15 \frac{D_{vh}}{2} + 0.05 \frac{D_{vh}}{2} \frac{D_{vn}}{2} + b_s \frac{D_{vn}}{2} \right)^T$$

сердечник
ток  
обмотка
футе-  
ровка

0.25 0.24 0.23 0.22 0.21 0.205 0.2 0.195 0.19 0.185 0.18 0.175 0.17 0.165 0.16 0.15 0.14 0.13

Т

Т И Г Л Е М Е Т А Л Л

Рис.2. Внешние радиусы слоев модели

В таблицу 1 сведены основные показатели ряда вариантов печи, полученные в результате вычислительного эксперимента. Обмотка индуктора выполнена по однофазной (указано в таблице) или трехфазной схеме. Плотность тока в обмотке равна 19.7 А/мм<sup>2</sup>.

Таблица 1

ЧАСТОТА F, Гц	МОЩНОСТЬ В ТИГЛЕ И ЗАГРУЗКЕ P <sub>2</sub> , кВт	ОСЕВОЕ СУММАР- НОЕ УСИ- ЛИЕ В ТИГ- ЛЕ И ЗА- ГРУЗКЕ F <sub>СУМ</sub> , Н	ОСЕВОЕ УСИЛИЕ В ЗАГРУЗКЕ F <sub>МЕТ</sub> , Н	РАДИАЛЬНОЕ СУММАРНОЕ УСИЛИЕ В ТИГЛЕ И ЗА- ГРУЗКЕ F <sub>Н</sub> , Н	КОЭФФИЦИЕНТ МОЩНОСТИ, д.е.
5	0.724	128.1	122.6	108	0.595
15	2.84	172.3	161.4	381.5	0.468
25	4.23	157.5	142.9	490.2	0.387
50	7.14	136.6	114	580.7	0.277
50 ААЗЗВВ	11.69	101.6	85.5	965.7	0.272
500	83.0	165	39.7	688.1	0.128
500 Однофазная	143.6	0	0	1252 (в металле 983)	0.16
1000 Однофазная	186.8	0	0	681.4 (в металле 422)	0.203

Из анализа таблицы следует:

- наибольшее интегральное осевое усилие в расплаве 161.4 Н, организующее эффективное одноконтурное движение металла, создается при частоте 15 Гц,

- с ростом частоты это усилие уменьшается, но возрастает осевое усилие в проводящем тигле, например, при частоте 500 Гц оно составило 125.3 Н по сравнению с 39.7 Н в расплаве,
- наибольшее интегральное радиальное усилие в расплаве 983 Н, формирующее двухконтурное усилие в металле, создается в режиме однофазного питания током частоты 500 Гц, при этом интегральное усилие, действующее на тигель, составляет 269 Н.

На рис. 3 показаны кривые распределений по радиусу дифференциальных величин: плотности тока  $j_c$  ( $A/m^2$ ), радиальной  $B_n$  и осевой  $B_t$  (Тл) составляющих магнитной индукции, удельных радиального  $F$  (Н) и осевого  $F_t$  усилий при питании индуктора трехфазной системой токов частоты 50 Гц.

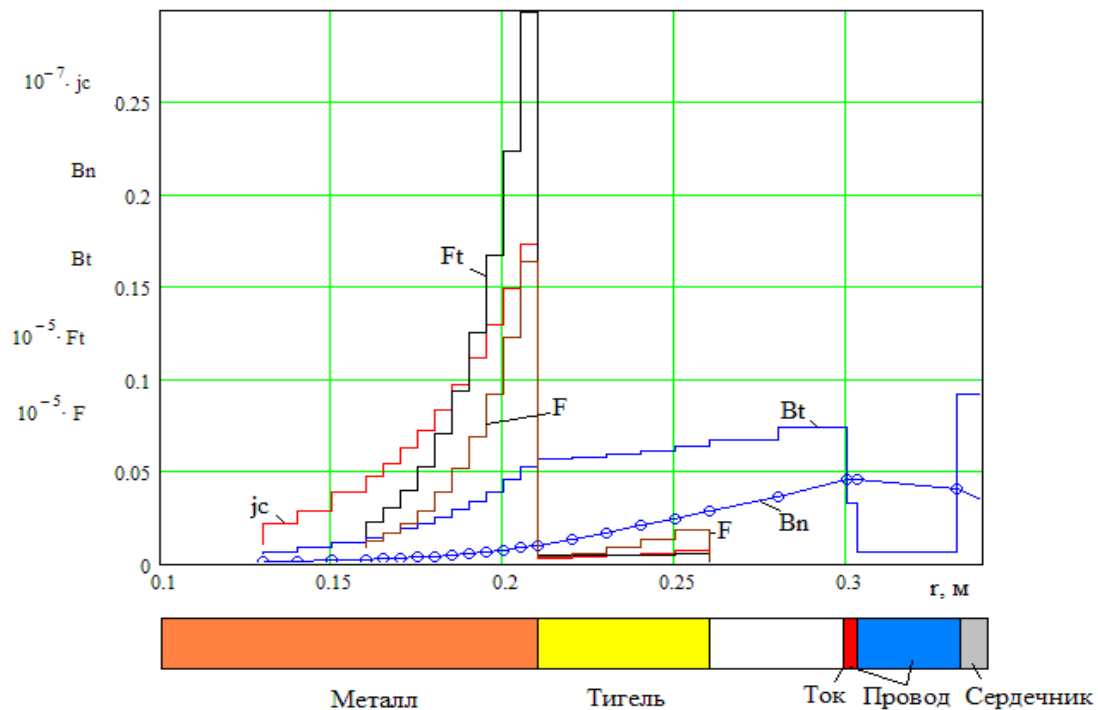


Рис. 3. Распределение величин по радиусу, частота 50 Гц

На рис. 4 приведены картины распределения удельных усилий и магнитной индукции по продольному сечению для указанного режима питания индуктора.

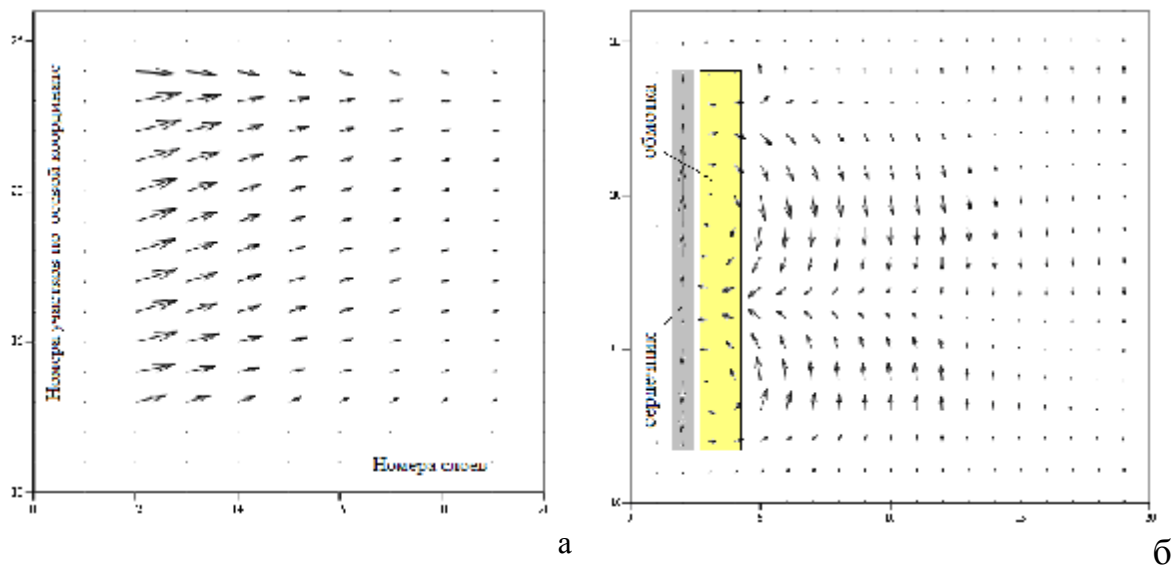


Рис. 4. Распределение удельных усилий (а) и индукции (б) по сечению при питании индуктора трехфазной системой токов частоты 50 Гц

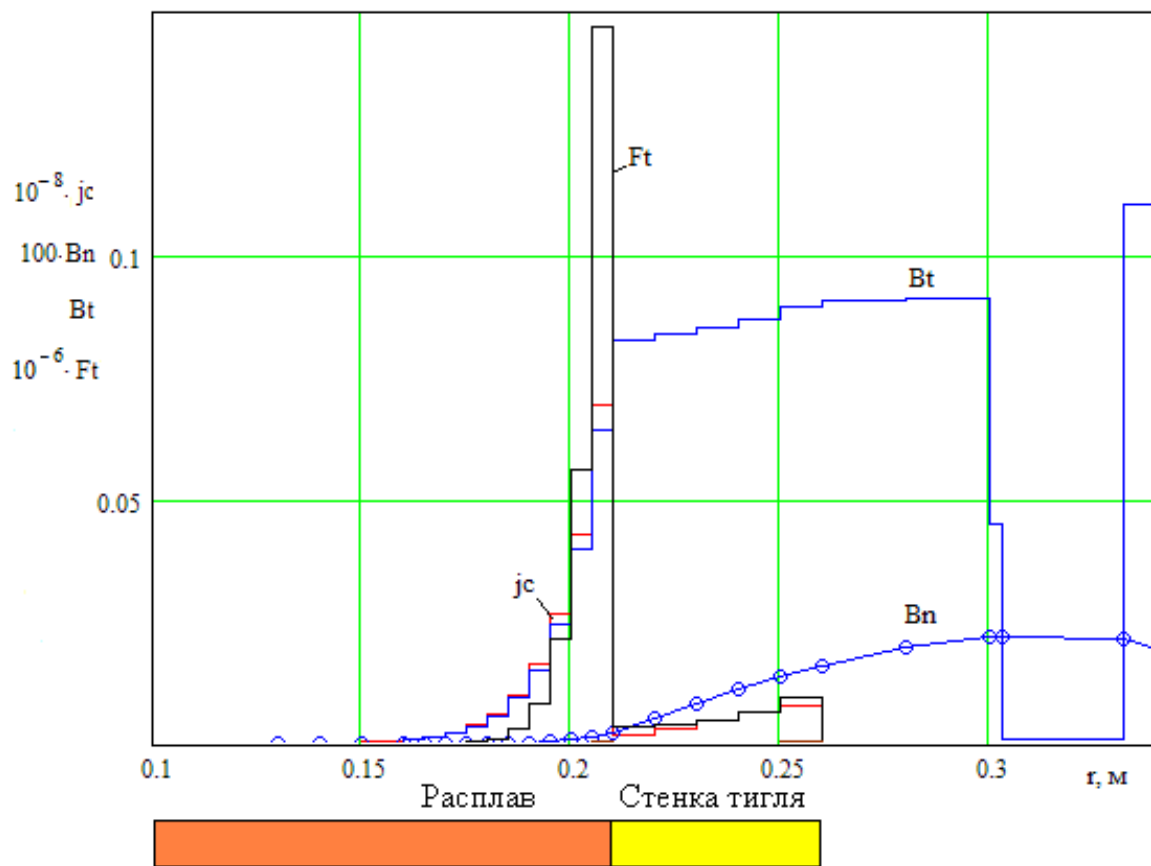


Рис.5. Распределения величин по радиусу при однофазном питании индуктора током частоты 500 Гц

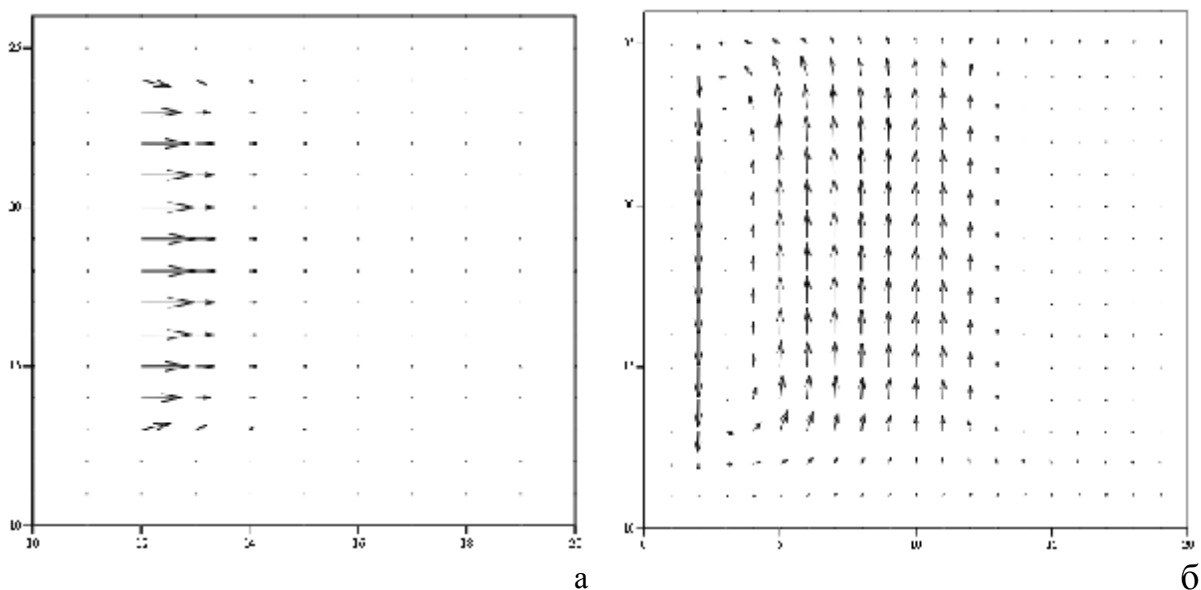


Рис. 6. Распределение удельных усилий (а) и индукции (б) по сечению ИТП при однофазном питании индуктора током частоты 500 Гц

На рис. 5 показаны аналогичные распределения дифференциальных величин по радиусу, а на рис. 6 - распределения удельных усилий и магнитной индукции для режима однофазного питания индуктора током частоты 500 Гц. Видно, что глубина проникновения электромагнитного поля в расплав уменьшается, преобладает осевая составляющая магнитной индукции и радиальная составляющая усилия. Это соответствует классическим представлениям об особенностях традиционного однофазного питания ИТП. Можно также сделать вывод о том, что питание индуктора многофазной системой токов пониженной частоты позволяет создавать распределение удельных сил по сечению расплава, благоприятное для формирования интенсивного перемешивания металла.

Прогресс в области производства силовых полупроводниковых приборов позволяет разрабатывать и проектировать эффективные многофазные системы электропитания индукторов двухчастотными токами на базе полностью управляемых IGBT и IGCT модулей.

На рис. 7 приведена принципиальная схема автономного полумостового последовательного инвертора, который обеспечивает формирование в нагрузке-индукторе тока высокой частоты, средняя линия которого изменяется при фазовой модуляции работы вентилях по синусоидальному закону низкой частоты [4], что обеспечивает воздействие на металлический расплав двухчастотного электромагнитного поля. Инвертор содержит два прямых управляемых вентиля VS1, VS2 и два встречных диода VD1, VD2, подключенные к источнику постоянного напряжения конденсаторы  $C_{кнч1}$ ,  $C_{кнч2}$  и дроссель  $L_{нч}$ , которые образуют высокочастотный колебательный контур.

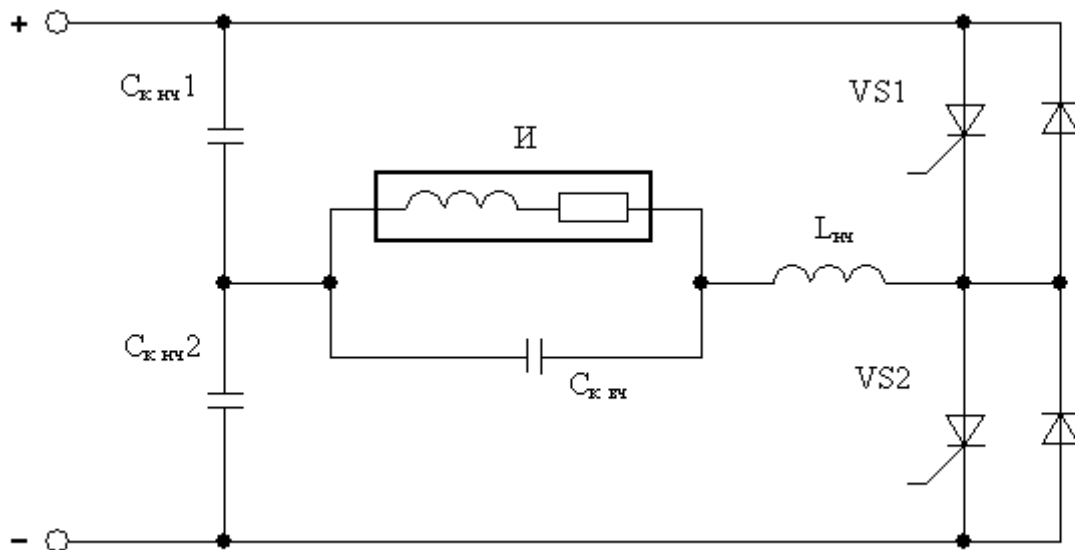


Рис. 7

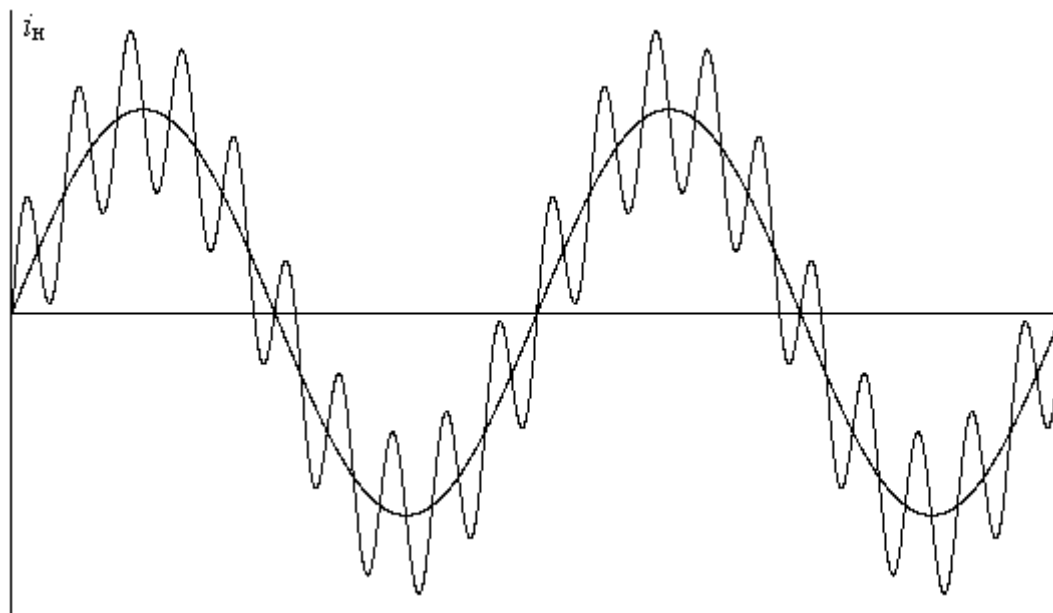


Рис. 8

На рис. 8 приведена расчетная осциллограмма тока нагрузки-индуктора И, полученная с помощью модели, разработанной в программе Simulink, из которой видно наличие двух составляющих – низкочастотной и высокочастотной. Для повышения эффективности электромагнитного перемешивания расплава целесообразно иметь трехобмоточный индуктор, соединенный по 3-х фазной схеме, при этом питание каждой обмотки нагрузки-индуктора можно осуществлять либо от отдельных инверторных ячеек, подсоединенных к отдельным источникам питания постоянного напряжения [5], либо от отдельных инверторных ячеек, подсоединенных к общему источнику питания постоянного напряжения [6].

Фазоинверсный способ управления автономным инвертором позволяет формировать разночастотный по времени ток питания индуктора.

На рис. 9 приведена схема автономного инвертора [7], которая состоит из прямых управляемых вентилях  $VS1 \div VS4$  и встречных диодов  $VD1 \div VD4$ , двух трансформаторов  $Tr_1$  и  $Tr_2$ , двух высокочастотных конденсаторов  $C_{вч1}$  и  $C_{вч2}$ , одного низкочастотного конденсатора  $C_{нч}$  и индуктора  $I$ , выполненного из двух полуобмоток. Инвертор может работать в двух режимах: первый для формирования в нагрузке-индукторе  $I$  токов высокой частоты и второй – для формирования токов низкой частоты. В первом режиме в первом полупериоде синхронно отпираются управляемые вентили  $VS1$  и  $VS2$ , соединенные с первичными обмотками трансформаторов  $Tr_1$  и  $Tr_2$  и с положительным полюсом источника постоянного напряжения, а во втором полупериоде синхронно отпираются управляемые вентили  $VS3$  и  $VS4$ , соединенные с теми же первичными обмотками трансформаторов  $Tr_1$  и  $Tr_2$  и с отрицательным полюсом источника питания постоянного напряжения. При этом в работе участвуют конденсаторы  $C_{вч1}$  и  $C_{вч2}$ , относительно небольшой емкости, которые образуют с соответствующими полуобмотками индуктора  $I$  высокочастотные колебательные контуры, а напряжения на конденсаторах  $C_{вч1}$  и  $C_{вч2}$  сдвинуты относительно друг друга на  $180^\circ$  эл. Поэтому напряжение на низкочастотном конденсаторе  $C_{нч}$ , емкость которого значительно больше емкостей конденсаторов  $C_{вч1}$  и  $C_{вч2}$ , равно нулевому значению, и он не участвует в работе.

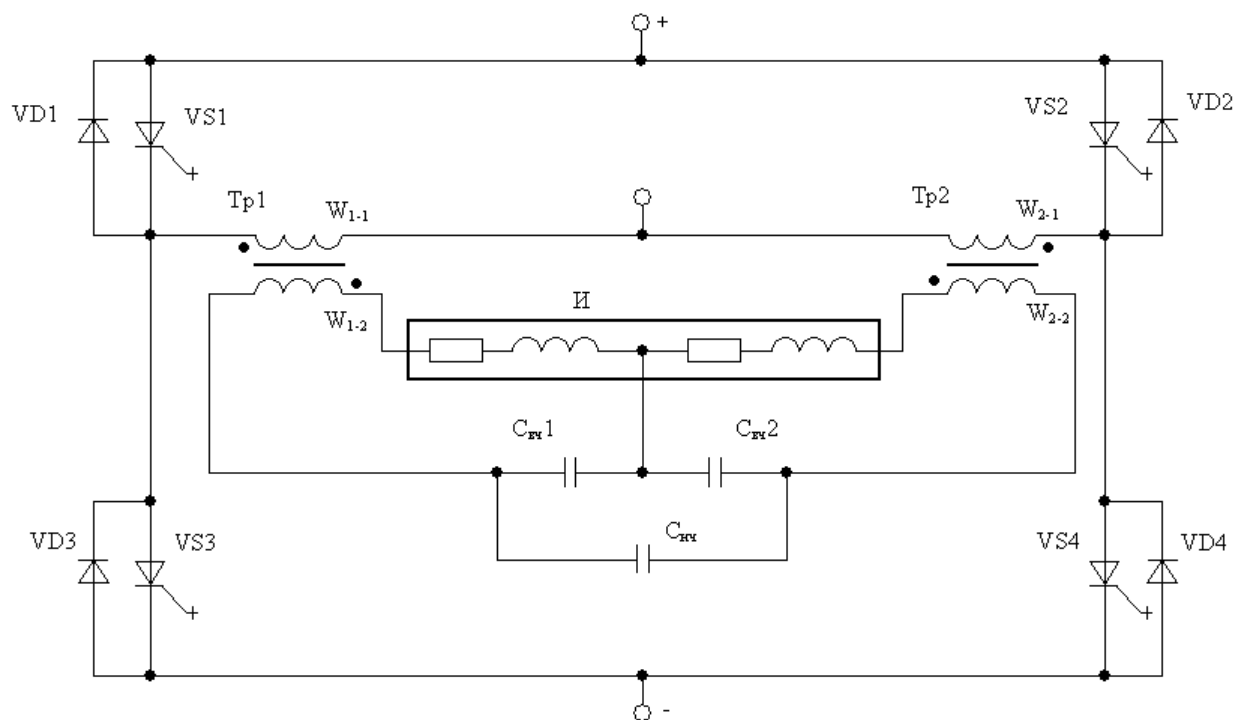


Рис. 9



Во втором режиме в первый полупериод синхронно отпираются управляемые вентили VS1 и VS4, соединенные с первичными обмотками тех же трансформаторов  $Tr_1$  и  $Tr_2$  и с разными полюсами (положительным и отрицательным) питающего источника постоянного напряжения, а во втором полупериоде синхронно отпираются управляемые вентили VS2 и VS3, соединенные с теми же первичными обмотками трансформаторов  $Tr_1$  и  $Tr_2$  и с теми же полюсами питающего источника постоянного напряжения. При этом напряжения на последовательно соединенных конденсаторах  $C_{вч1}$  и  $C_{вч2}$  синфазны, поэтому в работу включается и параллельно подсоединенный этим конденсаторам конденсатор  $C_{нч}$ , а эквивалентная емкость конденсаторов  $C_{вч1}$ ,  $C_{вч2}$  и  $C_{нч}$  оказывается значительно больше, чем емкость каждого из конденсаторов  $C_{вч1}$  и  $C_{вч2}$ , что позволяет генерировать в этом режиме низкочастотный ток без переключений в силовых цепях преобразовательного устройства. Таким образом, для нагрузки-индуктора И можно поочередно формировать токи высокой и низкой частоты, выбирая оптимальный закон их чередования.

Предприятием «РЭЛТЕК» разработан и производится комплекс оборудования для плавки цветных металлов в индукционных печах с графитовым тиглем вместимостью до 500 кг по меди и с многофазной системой электропитания индукторов токами разных частот мощностью 320 кВт. Данный комплекс позволяет расширить технологические возможности получения сложных прецизионных сплавов цветных металлов и повысить качество изделий.

## Библиографический список

1. Тиристорные преобразователи частоты для индукционных плавильных печей и нагревателей средней частоты / В.И. Лузгин, А.Ю. Петров, С.Ю. Кропотухин и др. Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий. Труды Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006. С.398-404.
2. Схемы питания индукторов для электромагнитного воздействия на жидкие металлы / Бегалов В.А., Сарапулов Ф.Н., Сокунов Б.А. Актуальные проблемы индукционного нагрева АРІН-05. Труды Международной научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 25.05.05-26.05.05. С. 138-144.
3. Плавильные комплексы на основе индукционных тигельных печей и их математическое моделирование: учебное пособие / В.И. Лузгин, С.Ф. Сарапулов, Ф.Н. Сарапулов, Б.А. Сокунов, Д.Н. Томашевский, В.Э. Фризен, И.В. Черных, В.В. Шипицын. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2005. 459 с.
4. Лузгин В.И., Петров А.Ю., Черных И.В., Шипицын В.В., Якушев К.В. Автономный полумостовой инвертор и способ управления работой автономного полумостового инвертора. Патент РФ на изобретение № 2231906, 2004, Бюл. № 18.
5. Лузгин В.И., Петров А.Ю., Черных И.В., Шипицын В.В., Якушев К.В. Устройство для индукционного нагрева и способ управления устройством для индукционного нагрева. Патент РФ на изобретение № 2231904, 2004, Бюл. № 18.
6. Лузгин В.И., Петров А.Ю., Черных И.В., Шипицын В.В., Якушев К.В. Устройство для индукционного нагрева и способ управления устройством для индукционного нагрева. Патент РФ на изобретение № 2231905, 2004, Бюл. № 18.
7. Заявка на патент № 2005108508/09 (010130).