

## **АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТИРИСТОРНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ЧАСТОТЫ ДЛЯ ПИТАНИЯ ДВУХ ТИГЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ В ИНДУКЦИОННОМ ПЛАВИЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ**

В настоящее время индукционные плавильные установки на основе тиристорных преобразователей частоты (ТПЧ) широко используются для плавки металлов. В качестве основного звена в таких преобразователях частоты широко используются резонансные инверторы тока, нагрузкой которого является тигельная индукционная плавильная печь (ИПП).

На государственном предприятии «Лутугинский научно-производственный валковый комбинат» (ГП «ЛНПВК»), специализирующимся на выпуске чугуновых и стальных листо-прокатных и сортопрокатных валков для прокатных станков предприятий металлургической промышленности, для увеличения объема производства и повышения качества выпускаемой продукции в 2013 году был приобретен индукционный плавильный комплекс немецкой фирмы ОТТО JUNKER [1] на базе ТПЧ с двумя 16-тонными ИПП. Однако этот комплекс так и не был запущен в эксплуатацию, т. к. немецкая фирма не укомплектовала ТПЧ системой управления.

Лишь 2022 году специалисты Донбасского государственного технического университета, проанализировав структуру комплекса, разработали новую систему управления [2] силовой частью ТПЧ для питания 16-тонных ИПП. Разработанная система управления была успешно введена в эксплуатацию в г. Лутугино на ГП «ЛНПВК» в индукционный плавильный комплекс фирмы ОТТО JUNKER. Испытания прошли в режиме плавки металла массой 16 тонн в одной печи при напряжении на индукторе 2600 В, выходной частотой 250 Гц и потребляемой мощностью 3,84 МВт, что соответствует заявленным техническим характеристикам.

В процессе эксплуатации плавильного комплекса возникла необходимость использовать его для подготовки в один этап сразу 32-х тонн металла. Поэтому была поставлена задача разработать алгоритм работы системы автоматизированного управления, позволяющий использовать ТПЧ для питания сразу двух ИПП входящих в состав комплекса.

В связи с этим целью данной работы является анализ работы ТПЧ с разработанным алгоритмом автоматизированного управления, позволяющим работать индукционному плавильному комплексу сразу на две ИПП, с возможностью регулировки подводимой мощности к каждой печи, для последующего его внедрения в систему управления ТПЧ индукционного плавильного комплекса фирмы ОТТО JUNKER на ГП «ЛНПВК» для производства прокатных валков.

Схема индукционного комплекса на базе ТПЧ с двумя ИПП, приведена на рисунке 1. Силовая часть индукционного комплекса построена на базе четырех однофазных резонансных инверторов тока [3]. Питание инверторов осуществляется от двух трехфазных выпрямителей, включенных параллельно для формирования двенадцатимпульсного выпрямленного постоянного напряжения. Первый и второй, а также третий и четвертый инверторы включены по питанию последовательно, параллельно каждому из мостов подключены переключающие тиристоры. При этом выходы первого и третьего инверторов, имеющих общую плюсовую питающую шину, подключены параллельно к конденсаторной батарее с первой печью и к разрядному первому дросселю с большой индуктивностью. Выходы второго и четвертого инверторов, имеющих общую минусовую питающую шину, подключены параллельно к конденсаторной батарее со второй печью и также к разрядному второму дросселю с большой индуктивностью.

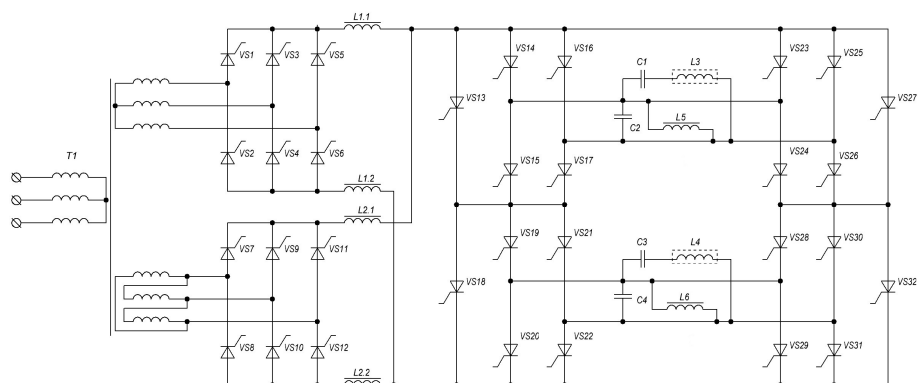


Рисунок 1 — Схема силовой части индукционного плавильного комплекса

После изучения документации на данный индукционный комплекс и анализа схемы его силовой части был разработан алгоритм автоматизированного управления ТПЧ, позволяющий работать ему сразу на две ИПП. Предложенный алгоритм работы системы управления позволяет регулировать среднюю мощность, подводимую к каждой печи путем изменения времени работы ТПЧ на первую или вторую печь в течение установленного временного интервала. Т. е. за время плавки на печи автоматически поочередно подается напряжение в заданном оператором процентном соотношении от установленного времени (2 мин), например, 10 %, 30 % или 70 % работает первая печь, и соответственно 90 %, 70 % или 30 % работает вторая печь. Таким образом, ТПЧ потребляет 100 % мощности за период плавки.

Реализация плавного распределения мощности между двумя печами осуществляется автоматическим включением и выключением в нужный момент времени переключающих тиристоров, подключенных параллельно каждому резонансному инвертору тока (рис. 1). Т. е. 30 % времени работают верхние инверторы (VS14–VS17 и VS23–VS26) и первая печь (L3), в этот момент нижние инверторы (VS19–VS22 и VS28–VS31) закорочены переключающими тиристорами (VS18, VS32), а 70 % времени работают нижние инверторы (VS19–VS22 и VS28–VS31) и вторая печь (L4), в этот момент верхние инверторы (VS14–VS17 и VS23–VS26) закорочены другими переключающими тиристорами (VS13, VS27). С помощью разрядных дросселей (L5, L6), включенных на выходе каждого инвертора, обеспечивается автоматическое выключение переключающих тиристоров.

Предложенный алгоритм работы ТПЧ с двумя печами и режим переключения с одной печи на другую был рассмотрен в работе [4]. В частности, в этой работе на компьютерной модели в программе OrCAD был проведен анализ работы ТПЧ в трех вариантах переключения с первого индуктора на второй и наоборот. Первый вариант — когда запуск нижних инверторов со второй печью происходит синхронно с выключением работающих верхних инверторов с первой печью путем включения переключающих верхних тиристоров. Вторым вариантом — когда запуск нижних инверторов со второй печью происходит на еще работающие верхние инверторы с первой печью и после того как в обеих печах через несколько периодов установится энергетический режим, происходит уже выключение верхних инверторов с первой печью путем включения переключающих верхних тиристоров. Третий вариант — когда запуск нижних инверторов со второй печью происходит на еще работающие верхние инверторы с первой печью и спустя два периода выходной частоты, происходит уже выключение верхних инверторов с первой печью путем включения переключающих верхних тиристоров.

В результате анализа установлено, что наиболее эффективным является алгоритм по третьему варианту, т. к. во время переключений нет перенапряжений и перегрузок по току, но есть на короткое время уменьшение значения выходного тока выпрямителя всего лишь на 15 % от номинального установившегося. На рисунке 2 приведены импульсы управления тиристорами инверторов и переключающих тиристоров, диаграммы изменения выходного тока выпрямителя, токов через переключающие тиристоры и напряжений на обоих индукторах при переключении с одной печи на другую и обратно.

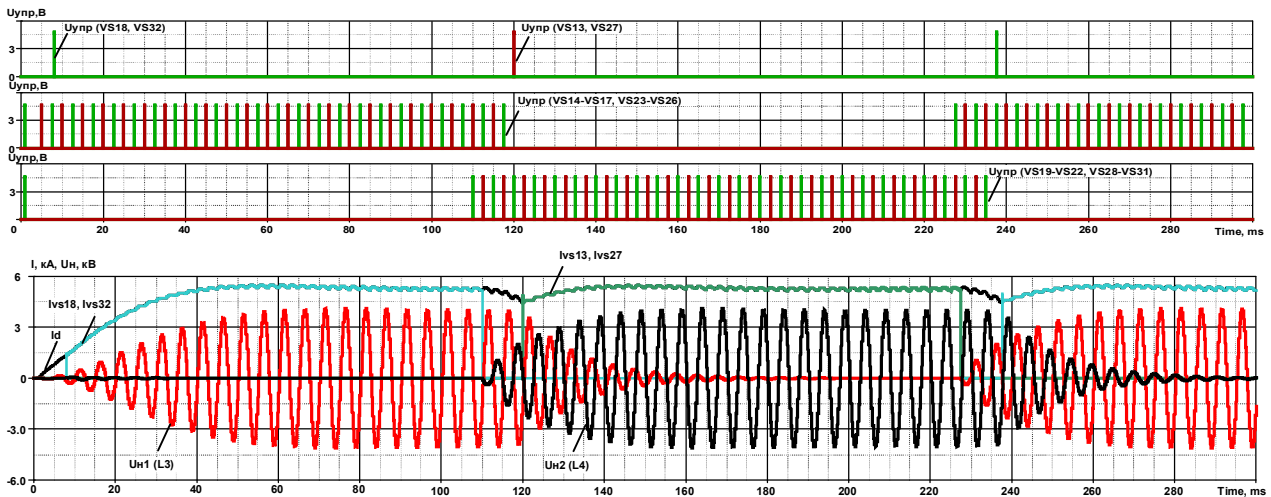


Рисунок 2 — Диаграммы импульсов управления тиристорами, выходного тока выпрямителя, токов через переключающие тиристоры и напряжений на обоих индукторах

Из диаграмм видно, что автоматическое переключение с первой печи на вторую с задержкой в два периода, обеспечивает выход на номинальный режим в течение 30 мс. При этом за время одновременной работы двух инверторов при переключении происходит уменьшение выходного тока выпрямителя всего лишь на 15 % от номинального значения и незначительное уменьшение напряжения на первой печи от номинального значения, а на второй печи осуществляется плавное формирование напряжения до номинального значения. Далее после выключения первого инвертора происходит плавное увеличение выходного тока выпрямителя и напряжения на второй печи до номинальных значений, а напряжение на первой печи продолжает уменьшаться до нуля. Процесс переключения со второй печи обратно на первую повторяется подобным образом.

Проанализировав работу ТПЧ в режиме автоматического переключения с одной печи на другую можно сделать вывод, что за весь период плавки среднее значение потребляемой мощности ТПЧ при переключении практически не меняется. Регулировка времени работы каждой печи в течение установленного 2-х минутного интервала времени позволяет регулировать среднюю мощность, подводимую к каждой печи за весь период плавки. Внедрение разработанного автоматизированного алгоритма и способа переключения обеспечит плавное распределение мощности ТПЧ между двумя печами. За весь период плавки постоянно будет обеспечиваться полное использование 100 % номинальной мощности ТПЧ, что обеспечит короткие простои для более высокой производительности, даст возможность осуществить одновременную плавку, выдержку и разливку на двух печах.

#### Список источников

1. OTTOJUNKER GmbH : [website]. [2024]. URL: <https://www.otto-junker.com/ru/>.
2. Саратовский Р. Н., Ушаков В. И. Система управления индукционным плавильным комплексом, предназначенным для производства прокатных валков на ГП «ЛНПВК» // 65 лет ДонГТИ. Наука и практика. Актуальные вопросы и инновации : сборник тезисов докладов юбилейной международной научно-технической конференции (г. Алчевск, 13–14 октября 2022 г.). Алчевск : ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ», 2022. Ч. 1. С. 220–222.
3. Силкин Е. М. Реализация и способы управления вентилями в инверторах тока преобразователей частоты для установок индукционного нагрева и плавки металлов // Силовая электроника. 2007. № 3. С. 108–114.
4. Саратовский Р. Н. Анализ работы тиристорного преобразователя частоты с двумя индукционными плавильными печами // Инновационные перспективы Донбасса : материалы 9-й международной научно-практической конференции (г. Донецк, 23–25 мая 2023г.) Донецк : ДонНТУ, 2023. Т. 2. : Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем. С. 63–70.