

УДК 621.791.927.5

**Фомичев С. К., Макаренко Н. А., Дьяков И. Е., Грановская Н. А., Синельник В. В.**

## **РАЗРАБОТКА ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОШЛАКОВЫХ ПРОЦЕССОВ**

Электрошлаковые процессы сварки (ЭШС), широко применяемые в промышленности во всём мире, основаны на выделении тепла при прохождении электрического тока через расплавленный шлак. Многие материалы при обычных температурах не проводят электрический ток и являются хорошими изоляторами. Например, стекло, часто применяемое в качестве изоляторов в конденсаторах, лампах, выдерживает высокие напряжения (в десятки тысяч Вольт), благодаря чему из него изготавливают высоковольтные изоляторы для линий электропередач, кинескопы мониторов и телевизоров, мощные генераторные лампы, а также другие изделия, работающие при высоких напряжениях. В то же время, при нагревании до температуры более 500 градусов, стекло теряет изолирующие свойства и начинает проводить электрический ток, при этом с ростом температуры его электропроводность растёт. Для электрошлаковых процессов применяют аналогичные материалы (флюсы неэлектропроводные в твёрдом состоянии и электропроводные в расплавленном), при расплавлении которых образуется расплав-шлак, проводящий электрический ток [1–2].

Актуальной является задача создания источника питания для электрошлаковых процессов, обеспечивающего равномерную загрузку питающей сети, снижающего потери электроэнергии на индуктивном сопротивлении контура тока. Наиболее оптимальными являются источники питания постоянного тока, собранные по схеме трёхфазных выпрямителей, однако процессы электрошлакового переплава (ЭШП) на постоянном токе практически не нашли применения в промышленности, что обусловлено рядом причин:

1. При взаимодействии мощного магнитного поля, создаваемого постоянным током большой силы с этим же током, проходящим через шлаковую ванну, наблюдается вращение шлаковой ванны, при этом жидкий шлак размывает гарнисаж и слиток приваривается к стенкам кристаллизатора, что выводит из строя дорогостоящий медный кристаллизатор. Вращающаяся шлаковая ванна увлекает за собой жидкий металл металлической ванны, при этом жидкий металл захватывает расплавленный шлак, в результате чего в слитке присутствуют неметаллические включения, что ухудшает качество наплавленного металла.

2. На постоянном токе происходит электролиз шлака, что приводит к выделению на положительном электроде опасных для здоровья газов (в основном фтора).

3. Процесс ЭШП на постоянном токе неустойчив и легко переходит в электродуговой, при котором зажигается электрическая дуга между переплавляемым электродом и слитком, при этом качество получаемого металла резко падает.

Целью работы является разработка принципов построения источников питания пониженной частоты, обеспечивающих протекание рабочего тока в виде разнополярных импульсов.

В 80-е годы прошлого века в ИЭС им. Е. О. Патона были построены электрошлаковые установки, работающие по принципу реверсирования постоянного тока. Однако данные установки были созданы на основе стандартных однофазных трансформаторов для ЭШП, в результате чего положительный эффект был незначителен. В то же время, одна из таких установок до настоящего времени успешно работает на Новолипецком металлургическом комбинате. Данная установка имеет трансформатор, который загружает лишь две фазы трёхфазной сети, что не позволяет решить проблему равномерной нагрузки на трёхфазную сеть. Во вторичной цепи трансформатора включены два мостовых тиристорных выпрямителя, выходы которых подключены к затравке и электроду (тиристоры не используются для фазового

управления напряжением и работают в ключевом режиме). Установка обеспечивает получение разнополярно импульсного тока в шлаковой ванне, который имеет пониженную частоту 1–5 Гц, что снижает потери на индуктивном сопротивлении вторичного контура.

Длительность импульсов (рис. 1) прямой и обратной полярностей определяет частоту выходного тока (длительность задаётся временем включения тиристорных мостов источника питания). Применение источника питания позволило снизить потери электроэнергии на 22 %, что явно недостаточно, в связи с чем изготовление подобных источников питания оказалось нецелесообразным. Причиной неэффективности источника питания пониженной частоты данной конструкции является то, что во время прохождения разнополярных импульсов, ток в цепи – пульсирующий (то есть непрерывно изменяется во времени (рис. 1)) (в этом случае индуктивное сопротивление контура продолжает оказывать влияние на потери мощности). Однако при этом резко снижаются (пропорционально снижению частоты тока) потери на перемагничивание ферромагнитных масс, находящихся внутри контура, чем и обуславливаются некоторые снижения потерь мощности.

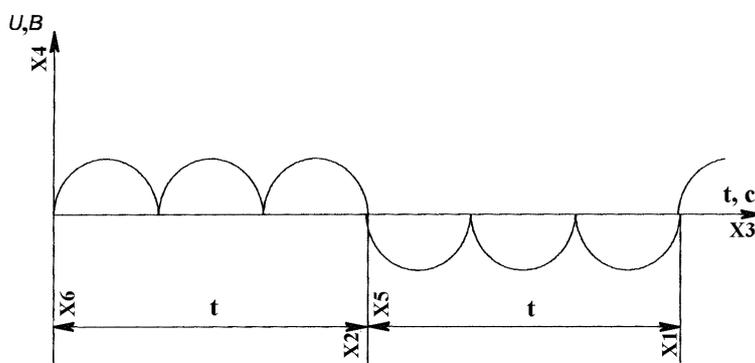


Рис. 1. График выходного напряжения установки конструкции ИЭС им. Е. О. Патона:  $t$  – время полупериодов прямой и обратной полярностей

При разработке нового источника питания для электрошлаковых процессов проведена серия экспериментов по их конструкции, в том числе по системам управления и по силовой части. Для автоматической электродуговой сварки под флюсом создан источник питания, рассчитанный на ток 1350 А, внедрённый на Макеевском металлургическом заводе, на котором отработывались системы управления, а также проведён эксперимент по влиянию пульсаций тока на потери мощности на индуктивном сопротивлении. Источник питания был собран по трёхфазной схеме (рис. 2), при этом каждая из обмоток трансформатора имеет свой выпрямительный блок, собранный по мостовой схеме. Выводы выпрямительных блоков через дроссели подсоединялись к общей шине.

Контроль тока и напряжения осуществлялся амперметром и вольтметром соответственно. В выпрямителе предусмотрены переключки, позволяющие подсоединять в параллель выпрямительные блоки. Таким образом, при снятых переключках – на каждый из дросселей подается пульсирующее напряжение, а при установленных переключках – практически постоянное. Для снятия вольтамперной характеристики выпрямители нагружались параллельно соединёнными балластными реостатами (типа РБ 301), а тиристоры переводились в диодные включения для обеспечения максимального напряжения холостого хода (рис. 3). При работе каждого из выпрямительных блоков на отдельный дроссель падение напряжения на выходе выпрямителя значительно выше, чем при параллельном соединении выпрямительных блоков. Таким образом, для уменьшения потерь на индуктивном сопротивлении контура необходимо, чтобы импульсы тока имели форму, близкую к прямоугольной (в данном случае, изменение величины тока будет иметь место лишь в начале и в конце импульса, поэтому потери на индуктивном сопротивлении контура будут минимальными; увеличение же длительности импульса (уменьшение частоты) снизит эти потери).

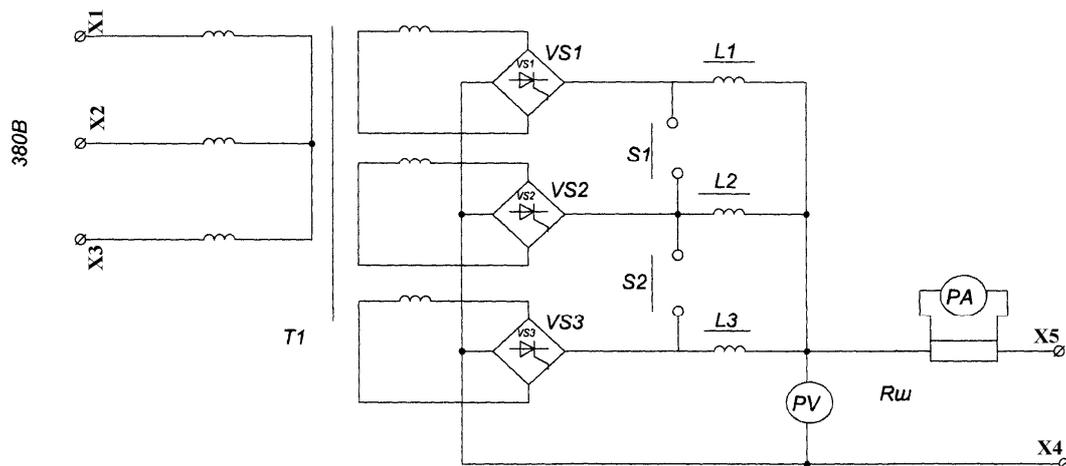


Рис. 2. Схема сварочного источника питания на ток 1350 А:

T1 – силовой трансформатор; VS1–VS3 – управляемые тиристорные мостовые выпрямительные блоки; L1–L3 – дроссели; Rш – шунт; PA – амперметр; PV – вольтметр

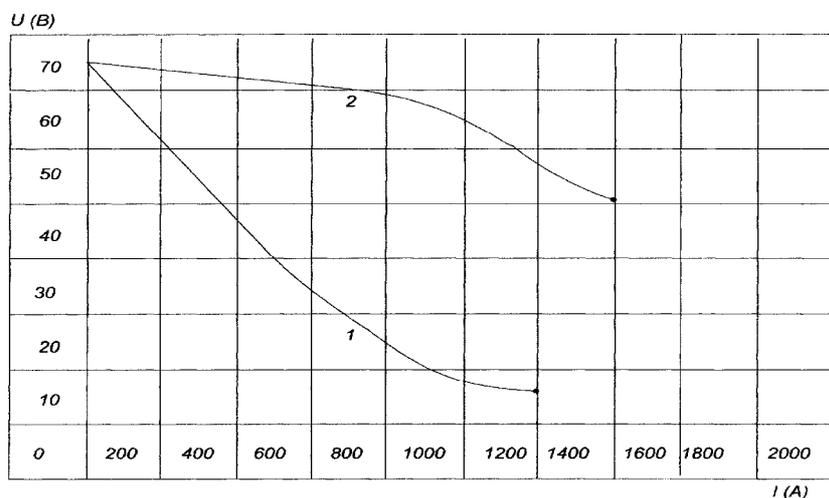


Рис. 3. Внешние статические вольтамперные характеристики сварочного выпрямителя:

1 – при включении дросселей в цепь каждого из выпрямительных блоков; 2 – при параллельном включении выпрямительных блоков с включением в сварочную цепь общего дросселя

Для проведения экспериментов был взят выпрямитель ВГМ-5000, имевшийся на ОАО «Днепропресс» (г. Днепропетровск). Данный выпрямитель собран по схеме, имеющей уравнивающий реактор (рис. 4) и предназначенный для многопостовой (до 30 постов) сварки в среде защитных газов, а также для ручной дуговой сварки. Регулировка выходного напряжения осуществляется переключением отводов первичных обмоток. При соединении первичных обмоток треугольником выпрямитель развивает наиболее высокое напряжение холостого хода (60 В). Данного напряжения достаточно для электрошлаковой сварки, рабочее напряжение при которой составляет порядка 44 В. Плавное изменение напряжения на выходе выпрямителя можно получить путём замены диодов тиристорами. Изменение полярности выходного напряжения целесообразно осуществить включением вместо каждого из диодов двух встречно-параллельно включённых тиристоров (рис. 5). При работе тиристора VS1 на выходе выпрямителя – одна полярность напряжения, а при работе тиристора VS2 – противоположная. Так как таких тиристорных групп – шесть, то на выходе выпрямителя будет разнополярным импульсное напряжение, частота которого определяется частотой переключения групп тиристоров.

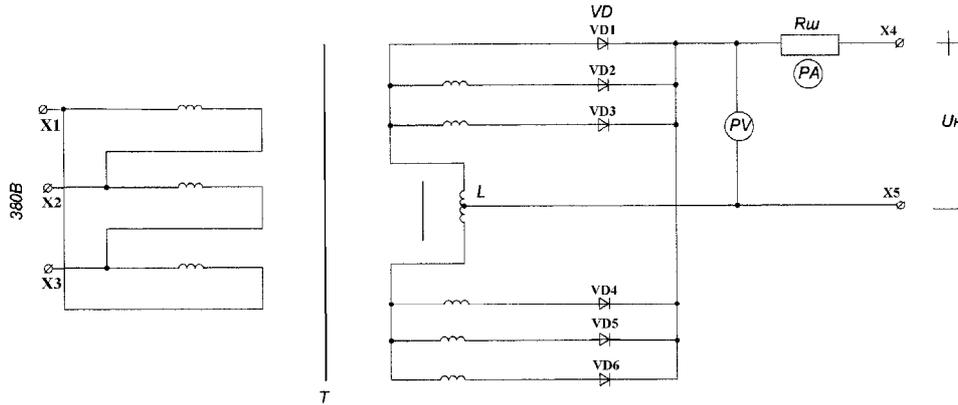


Рис. 4. Схема выпрямителя ВМГ-5000:

Т – силовой трансформатор; VD – диоды; L – уравнивающий реактор; Rш – шунт; PA – амперметр; PV – вольтметр

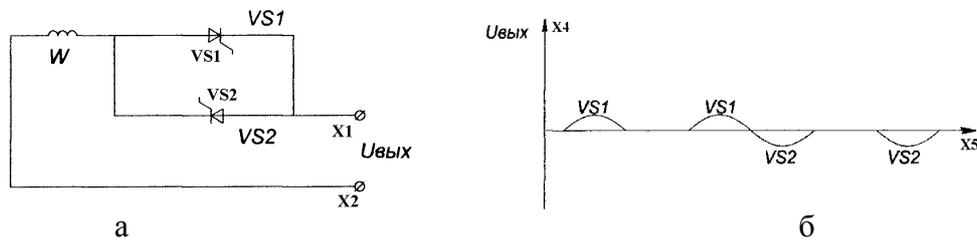


Рис. 5. Верхняя работа одной ветви выпрямителя со встречно-параллельно включенными тиристорами:

а – схема ветви; W – вторичная полуобмотка силового трансформатора; VS1–VS2 – тиристоры; б – график напряжения на выходе

На рис. 6 представлена диаграмма напряжений на выходе выпрямителя. Изменения напряжения на выходе источника питания, а, следовательно, и тока, при наличии нагрузки наблюдаются лишь в начальный момент импульса (время нарастания тока  $t_1$ ) и в момент спада тока (время спада  $t_2$ ) – в конце импульса.

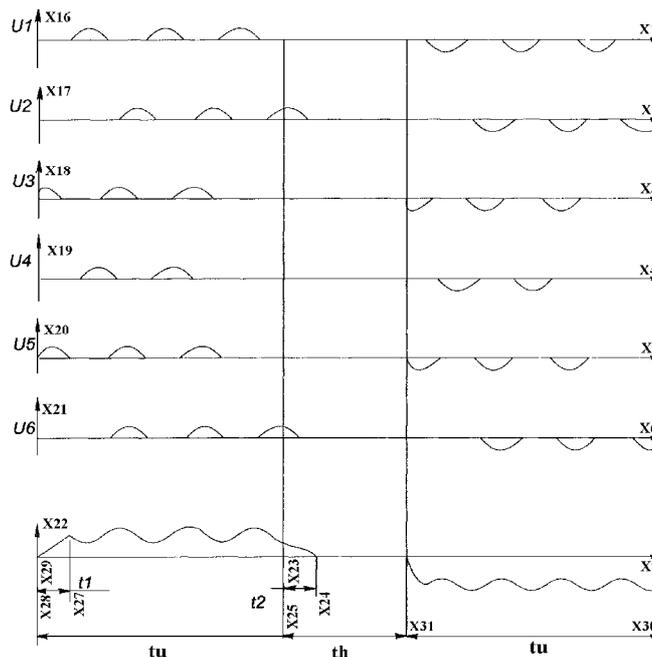


Рис. 6. Диаграмма напряжений источника питания электрошлакового процесса:

$t_и$  – время импульса;  $t_п$  – время паузы;  $t_1$  – время нарастания тока;  $t_2$  – время спада тока

Пульсации тока в течение прохождения импульса тока при шестифазной системе выпрямителя крайне незначительны (2–5 % в зависимости от угла отпирания тиристоров). Таким образом, потери на индуктивном сопротивлении контура для такого источника питания будут составлять лишь несколько процентов от потерь однофазного источника питания. Эти потери будут тем меньше, чем больше будет время импульса  $t_n$  (при этом, уменьшается частота нарастаний и спада тока). Таким образом, с уменьшением частоты разнополярных импульсов потери на индуктивном сопротивлении контура резко снижается. Время паузы  $t_n$  составляет 0,02 с, что необходимо для надёжного запираания тиристоров VS1 или VS2 при смене полярности. В схеме выпрямителя ВМГ-5000 имеется уравнивающий реактор L, представляющий собой катушку индуктивности. Однако в уравнительном реакторе магнитные потоки полуобмоток направлены встречно, что сводит его индуктивность к нулевой величине, а во время протекания импульса тока индуктивность не оказывает влияния на потери электроэнергии. В то же время, в момент включения тиристоров (в начале протекания импульса), такие потери имеют место. При реверсировании тока потери в уравнительном реакторе возрастают из-за возникновения дополнительных затрат энергии на перемагничивание сердечника уравнительного реактора при смене направления тока в его обмотках, в связи с чем целесообразно применение двух отдельных уравнительных реакторов для каждой из полярностей тока нагрузки (рис. 7).

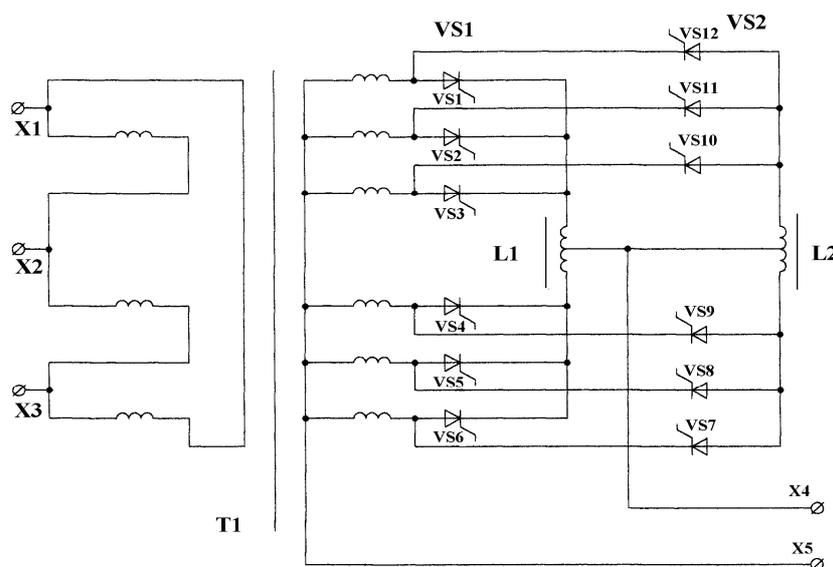


Рис. 7. Схема силовой части источника питания для электрошлаковых процессов:

T1 – силовой трансформатор; L1, L2 – уравнительные реакторы; VS1–VS2 – тиристорные выпрямительные блоки

В разработанном источнике питания незначительно изменена схема подключения уравнительных реакторов по сравнению со схемой выпрямителя ВМГ-5000, что позволяет применять два уравнительных реактора (по одному для каждой из полярностей тока) и, тем самым, снизить потери на перемагничивание сердечников. Кроме того, существенно уменьшается характерный шум (в виде хлопков) во время смены полярности тока нагрузки.

Важной частью источника питания является схема управления тиристорами, которая должна обладать высокой надёжностью, быть доступной в ремонте и иметь невысокую стоимость, в связи с чем разработана схема управления, представленная на рис. 8.

Схема управления работает следующим образом: генератор Г1 вырабатывает высокочастотные импульсы, частота которых регулируется потенциалом R1, с выхода генератора импульсы поступают на счётчики СИ (отдельные для каждой из фаз), которые срабатывают от каждого 64-го импульса (при срабатывании счётчиков срабатывают их оконечные каскады, подающие напряжение на управляющие электроды силовых тиристоров). Изменяя частоту

генератора Г1, изменяется время прихода 64-го импульса на счётчики импульсов СИ, а, следовательно, и фаза отпирания тиристоров (тем самым осуществляются регулировка напряжения на выходе источника питания).

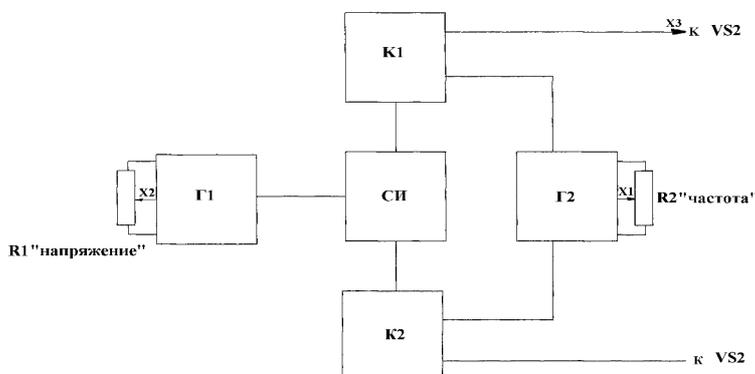


Рис. 8. Блок-схема управления источника питания:

2 – потенциометры; П – генераторы системы управления напряжением; СИ – счётчики импульсов; Г-2 – генератор частоты разнополярного тока; К1–К2 – коммутаторы; R1 – потенциометр регулировки выходного напряжения; R2 – потенциометр регулировки частоты разнополярноимпульсного тока

С выходов счётчиков СИ управляющий сигнал подаётся через коммутирующие К1 и К2 на силовые тиристоры; генератор Г2 низкочастотных импульсов (1/10Гц) поочередно включает группы тиристоров VS1 и VS2, что обеспечивает смену полярности напряжения на выходе источника питания. Регулировка частоты разнополярноимпульсного тока осуществляется потенциометром R2.

В настоящее время источник питания прошел промышленные испытания и подготовлен к внедрению на ОАО «Днепропресс» (г. Днепропетровск).

## ВЫВОДЫ

1. Для электрошлаковых процессов целесообразно применять источники питания пониженной частоты (1/10 Гц), собранные по принципу трёхфазного реверсируемого выпрямителя, обеспечивающие протекание рабочего тока в виде разнополярных импульсов.

Разработанный источник питания равномерно загружает 3-х фазную сеть и обеспечивает снижение потерь электроэнергии на индуктивном сопротивлении вторичного контура установки.

2. Установлено, что применение шестифазной схемы реверсивного выпрямителя с уравнительными реакторами обеспечивают минимальные пульсации выходного напряжения и соответственно наиболее низкие потери электроэнергии во вторичном контуре электрошлаковой установки

3. Установлено, что применение двух уравнительных реакторов (по одному для каждой из полярностей тока) снижает уровень шума и уменьшает потери на электроэнергию.

4. Управление тиристорными блоками источника питания целесообразно производить с помощью цифровых систем управления, обеспечивающих наиболее точные распределения нагрузки между фазами сети 380 В.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Прох Ц. Справочник по сварочному оборудованию / Ц. Прох, Б. М. Шпаков, Н. Н. Яворская. – К. : Техника, 1978. – 151 с.
2. Цукерман М. Б. Источник питания сварочной дуги и электрошлакового процесса / М. Б. Цукерман. – М. : Высш. школа, 1974 – 237 с.
3. Сварка в машиностроении : справочник в 4 т. Т. 4 / под ред. Ю. Н. Зорина. – М. : Машиностроение, 1979. – 512 с.