

Повышение качества работы УЗ технологических аппаратов на примере процесса сварки тонких листовых материалов

Барсуков Р.В., Абраменко Д.С., Ильченко Е.В.

Аннотация – Статья посвящена регуляторам напряжения, используемым при построении УЗ технологических аппаратов. Рассмотрены схемы тиристорного и чопперного регуляторов напряжения, выделены достоинства и недостатки названных схем. Проанализированы результаты применения различных схем и законов регулирования.

Ключевые слова – УЗ аппарат, регулирование, чопперный регулятор, тиристорный регулятор.

Введение

Максимальная эффективность различных технологических процессов, реализуемых при помощи ультразвуковых колебаний высокой интенсивности, обеспечивается только при определенных (оптимальных) параметрах воздействия.

Одним из основных параметров воздействия, определяющих эффективность ультразвукового воздействия, является амплитуда механических колебаний излучающей поверхности ультразвуковой колебательной системы (УЗКС) [1].

Амплитуда колебаний излучающей поверхности УЗКС зависит от свойств колебательной системы и параметров питающего напряжения. Стабильность амплитуды колебаний, характер переходных процессов и влияние внешних дестабилизирующих факторов в установившемся режиме определяются свойствами используемой в ультразвуковом аппарате системы управления параметрами питающего напряжения УЗКС. Стабильность амплитуды, в конечном итоге, определяет качество реализуемых процессов.

Существует ряд УЗ технологий, где предъявляются повышенные требования к стабильности величины амплитуды колебаний. Так, например, стабильность амплитуды механических колебаний в процессе ультразвуковой сварки определяет качество шва вдоль его длины.

Экспериментальные исследования процесса сварки тонких листовых пленок (толщиной от 30 мкм до 70 мкм) при формировании протяженных швов показали, что существующее УЗ оборудование [Гиминей ультра и т.д.] не пригодно для решения подобной задачи. Характеристики сварного шва в значительной мере меняются от начала к концу шва, происходит замытие передней кромки и т.д.

Для решения проблемы были проведены исследования функциональных возможностей существующего ультразвукового сварочного оборудования с целью выявления причин дестабилизации амплитуды воздействия, снижающей качество шва. В результате исследований были предложены и реализованы технические решения по стабилизации амплитуды колебаний при реализации процесса сварки.

Структура типового УЗ генератора

Для выявления причин, снижающих качество регулирования амплитуды колебаний и поиска путей повышения стабильности амплитуды колебаний при выполнении протяженных швов проведен анализ структуры УЗ оборудования

На рисунке 1 приведена структурная схема типового УЗ генератора.

Элементы 1, 2, 3, 4 составляют электроакустический тракт преобразования электрической энергии промышленной сети в энергию упругих колебаний ультразвуковой частоты. Блок 1 представляет собой регулируемый источник постоянного напряжения, которое поступает на транзисторный инвертор 2. Частота преобразования инвертора задается управляемым генератором ультразвуковой частоты 5.

На выходе инвертора 2 формируется напряжение прямоугольной формы, с амплитудой, равной напряжению на выходе источника 1. Это напряжение поступает на согласующую цепь 3, где происходит выделение и усиление первой гармоники входного сигнала. С выхода цепи согласования напряжение поступает на пьезоэлементы колебательной системы. Элементы блок-схемы 6, 8, 10 выделяют сигналы обратной связи. В качестве узла 7 используется микроконтроллер, который реализует алгоритмы управления и стабилизации амплитуды механических колебаний ультразвуковой колебательной системы и координирует работу всех остальных узлов ультразвукового генератора.

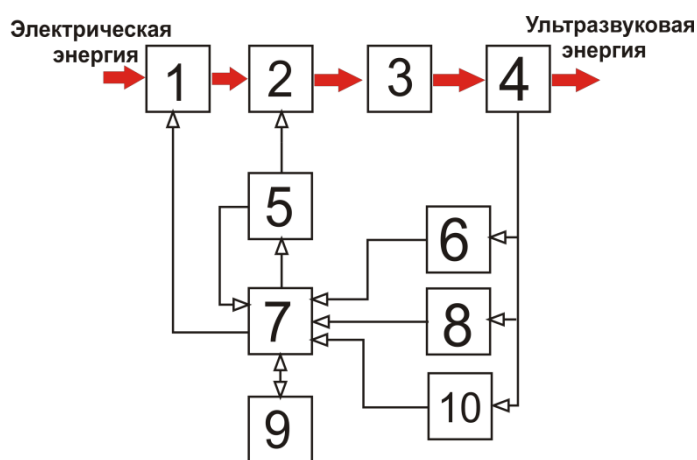


Рисунок 1 – Структурная схема ультразвукового генератора

Как правило, регулируемый источник постоянного напряжения представляет собой тиристорный регулятор, обеспечивающий регулирование амплитуды колебаний. Рассмотрим его далее более подробно.

Тиристорный регулятор напряжения

Схема простейшего тиристорного регулятора напряжения представлена на рисунке 2. На тиристор с диодного моста поступает выпрямленное двухполуволновое сетевое напряжение. В зависимости от момента открытия тиристора зависит длительность полуволны заряжающей конденсатор С2. Тиристор автоматически закрывается при уменьшении напряжения до нуля. Таким образом, управляющий сигнал тиристора должен быть синхронизирован с началом полуволны сетевого напряжения.

При таком методе управления на выходе схемы неизбежно возникают пульсации. Для подавления этих пульсаций необходимо увеличивать емкость выходного конденсатора

С2. Приемлемая амплитуда пульсаций достигается при емкости выходного конденсатора порядка сотен микрофарад (100 – 500 мкФ).

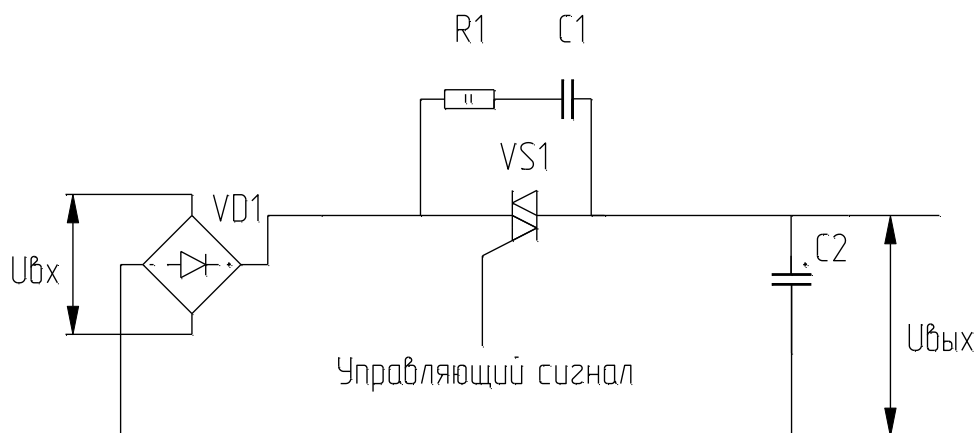


Рисунок 2 – Схема тиристорного регулятора

Представленная схема тиристорного регулятора имеет ряд существенных недостатков, основным из которых является низкая скорость изменения выходного напряжения. Ограничивающий фактор – возникновение больших импульсных токов при ускоренной зарядке емкости C2 максимальным напряжением.

Второй недостаток – невозможность управления скоростью убывания напряжения на выходе схемы. При этом скорость управления определяется постоянной времени разрядки конденсатора C2 и величиной акустической нагрузки. Так как емкость данного конденсатора достаточно велика (100 – 500 мкФ), скорость убывания выходного напряжения мала.

Таким образом, можно сделать вывод об инерционности подобного способа регулирования.

В существующих системах управления тиристорными схемами используются двухпозиционные регуляторы. Двухпозиционные регуляторы обеспечивают хорошее качество регулирования для инерционных объектов с малым запаздыванием, не требуют настройки и просты в эксплуатации. Эти регуляторы представляют обычный и наиболее широко распространенный метод регулирования [1].

Исходный текст функции расчета выходного значения двухпозиционного регулятора представлен ниже:

```
void Regulator (unsigned int Current) {  
    if (Current > SetCurrent) {  
        if (Y > PowerMin)    Y--;  
    } else {  
        if (Y < PowerMax)    Y++;  
    }  
    return Y;};
```

Назначение переменных: Current – текущее значение сигнала по обратной связи, SetCurrent – уставка, Y – текущее значение регулятора мощности, PowerMax –

максимальное допустимое значение мощности, PowerMin – минимальное допустимое значение мощности.

Опытная эксплуатация ультразвукового оборудования, оснащенного регулятором напряжения подобного типа показала, что в процессе работы происходит существенное перерегулирование, а так же наблюдается колебательный характер переходных и установившихся режимов работы.

На рисунке 3 приведена переходная характеристика тиристорного регулятора. Длительность переходного процесса составляет 0,5 с.

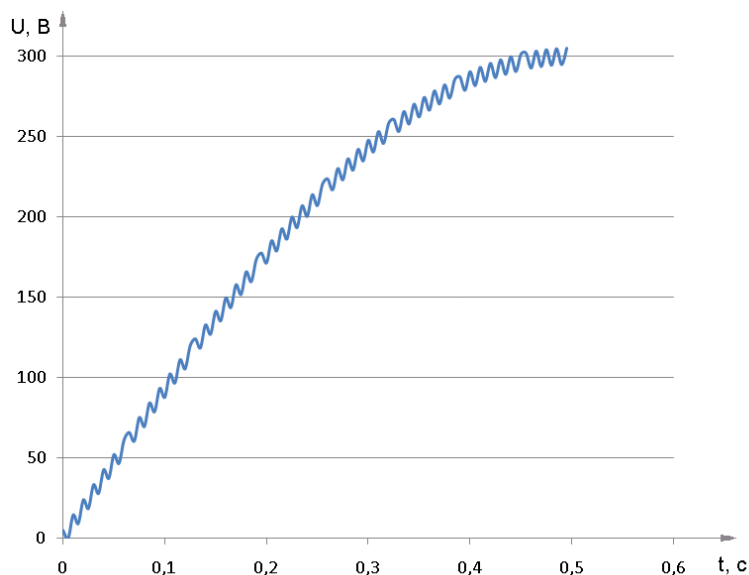


Рисунок 3 – Переходная характеристика тиристорного регулятора.

На рисунке 4 представлен сигнал обратной связи, пропорциональный амплитуде механических колебаний УЗКС. Из графика видно, что относительная амплитуда пульсаций в установившемся режиме составляет 20%.

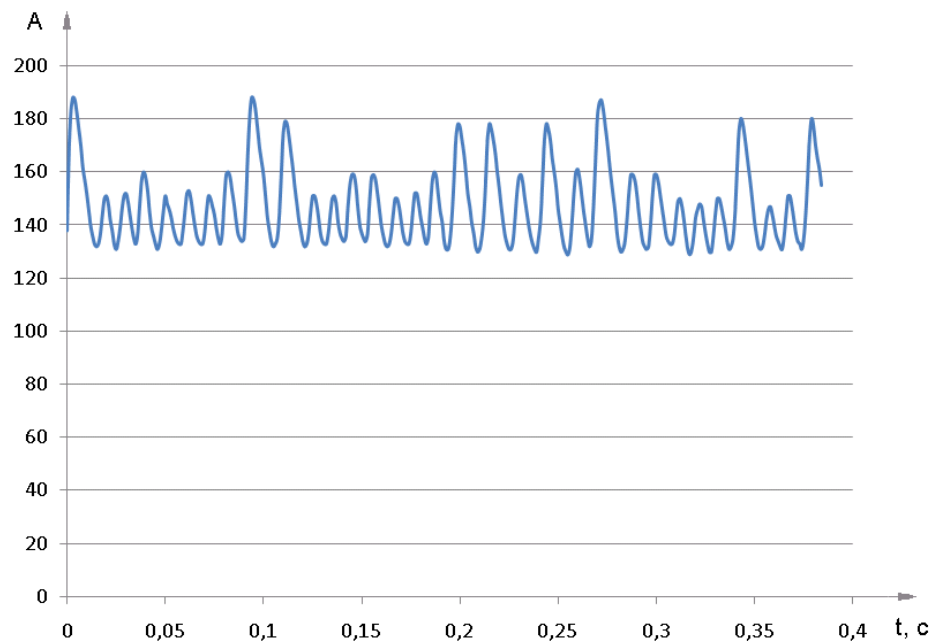
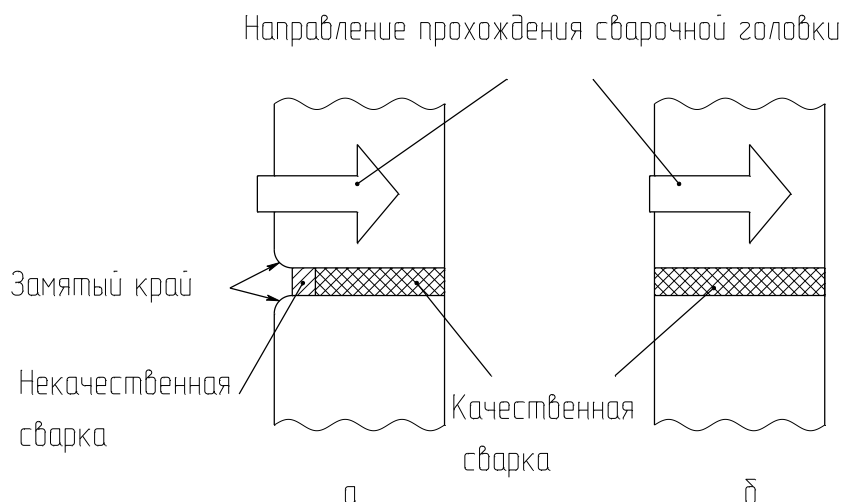


Рисунок 4 – Изменение во времени сигнала обратной связи, прямо пропорционально связанного с амплитудой УЗКС.

Колебания амплитуды в реальных технологических процессах являются недопустимыми. Так, например, при УЗ сварке тонких листовых термопластичных материалов (при формировании протяженных непрерывных швов) необходимо обеспечить минимальное время переходных процессов и обеспечить высокую стабильность амплитуды в установившемся режиме. При невыполнении этих требований качество сварного шва будет значительно снижаться.

В качестве примера, на рисунке 5, а схематически представлен эскиз сварного шва, выполненный аппаратом с тиристорным регулятором (двухпозиционным регулятором).

Невысокая скорость нарастания сигнала приводит к таким дефектам как непроваривание начального участка шва, смятие края свариваемого материала; перерегулирование приводит к прожиганию свариваемых материалов.



а – шов полученный аппаратом, использующим двухпозиционное регулирование;
б – шов полученный аппаратом, использующим пропорциональное регулирование.

Рисунок 5 – Эскизы сварных швов.

Для реализации технологий УЗ сварки, где предъявляются высокие требования к стабильности амплитуды механических колебаний УЗКС необходимо использовать более быстродействующие схемы регулирования напряжения питания ВЧ каскадов УЗ генератора.

Чопперный регулятор напряжения

Чопперный регулятор лишен большинства недостатков тиристорного регулятора. Пример схемы чопперного регулятора приведен на рисунке 6.

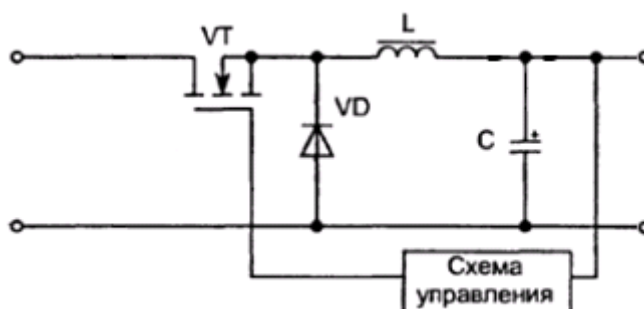


Рисунок 6 – Схема чопперного регулятора

Схема чопперного регулятора, приведенная на рисунке 6 состоит из следующих обязательных элементов:

- Силовой ключ VT, осуществляющий высокочастотную коммутацию тока (обычно роль ключа выполняет мощный биполярный или полевой транзистор);
- Разрядный диод VD;

- НЧ сглаживающий фильтр LC;
- Схема управления, осуществляющая стабилизацию напряжения или тока [2].

Схема чопперного регулятора упрощается, так как нет необходимости синхронизировать управляющий сигнал с сетевым напряжением. Управление ключом чопперного регулятора осуществляется при помощи ШИМ-сигнала высокой частоты. Амплитуда пульсаций на выходе чопперной схемы на порядок меньше амплитуды пульсаций на выходе тиристорного регулятора. В схеме чопперного регулятора емкость выходного конденсатора составляет единицы микрофард (3 мкФ). Использование такой емкости и ВЧ сигнала для управления значительно ускоряет скорость изменения напряжения на выходе схемы и, как следствие, сокращает длительность переходных процессов. Ниже представлена переходная характеристика чопперного регулятора. Длительность переходного процесса не превышает 40 мс.

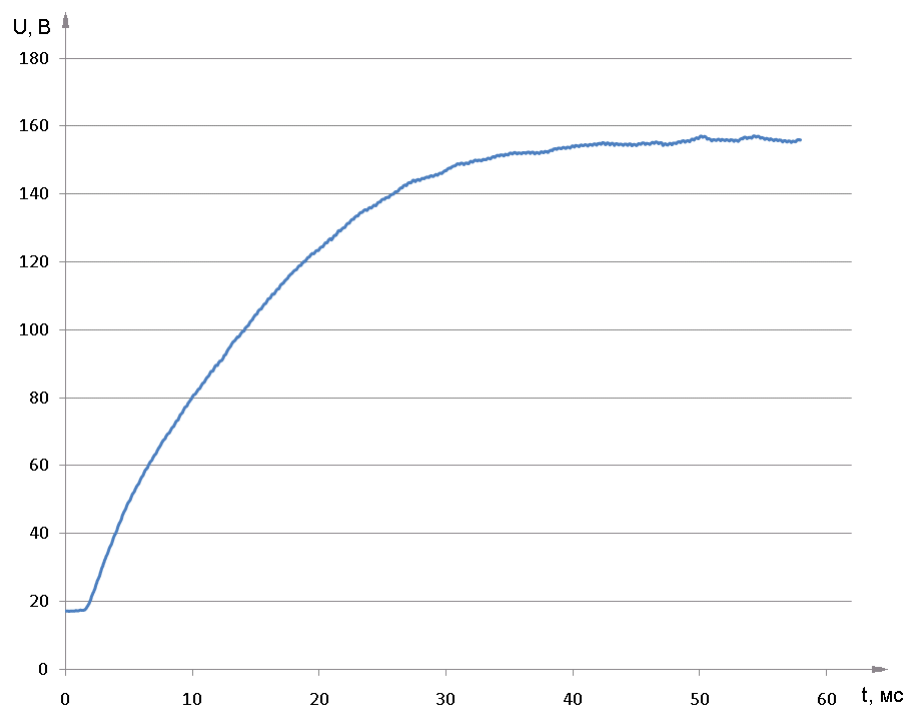


Рисунок 7 – Переходная характеристика чопперного регулятора

Более высокая скорость работы чопперного регулятора позволяет реализовать качественное управление амплитудой механических колебаний УЗКС, например с использованием ПИД закона регулирования, который в дискретной форме имеет следующий вид:

$$u_{i+1} = K_p e_i + K_i \sum_{k=0}^i e_k \cdot \Delta t + \frac{K_d(e_{i+1} - e_i)}{\Delta t};$$

В качестве микропроцессорного устройства управления в ультразвуковых аппаратах широкое распространение получили восьмиразрядные микроконтроллеры. Большинство из них имеют только аппаратный множитель, а деление производится

соответствующими математическими алгоритмами. По этой причине из формулы расчета необходимо исключить все операции деления, заменив их умножением. Таким образом, в конечном варианте формула расчета будет иметь вид:

$$u_{i+1} = K_p e_i + K_i' \sum_{k=0}^i e_k + K_d' (e_{i+1} - e_i),$$

$$\text{где } K_i' = K_i \Delta t, K_d' = \frac{K_d}{\Delta t}.$$

Исходный текст функции расчета выходного значения ПИД регулятора представлен ниже:

```
void PID_Regulator (unsigned int Current) {  
    e = Current - SetCurrent;  
    sum += e;  
    delta = e - e_last;  
    e_last = e;  
    Y = Kp*e + Ki*sum + Kd*delta;  
    if (Y>PowerMax) {  
        return PowerMax;  
    }else if (Y<PowerMin) {  
        return PowerMin;  
    };  
    return Y;  
}
```

Для расчета функции необходимо передать текущее значение сигнала по обратной связи, а так же задать значение переменных Kp, Ki, Kd, являющихся коэффициентами звеньев ПИД регулятора.

На рисунке 8 представлен сигнал обратной связи, пропорциональный амплитуде механической колебаний, полученный в процессе формирования протяженного шва при сварки тонких листовых материалов.

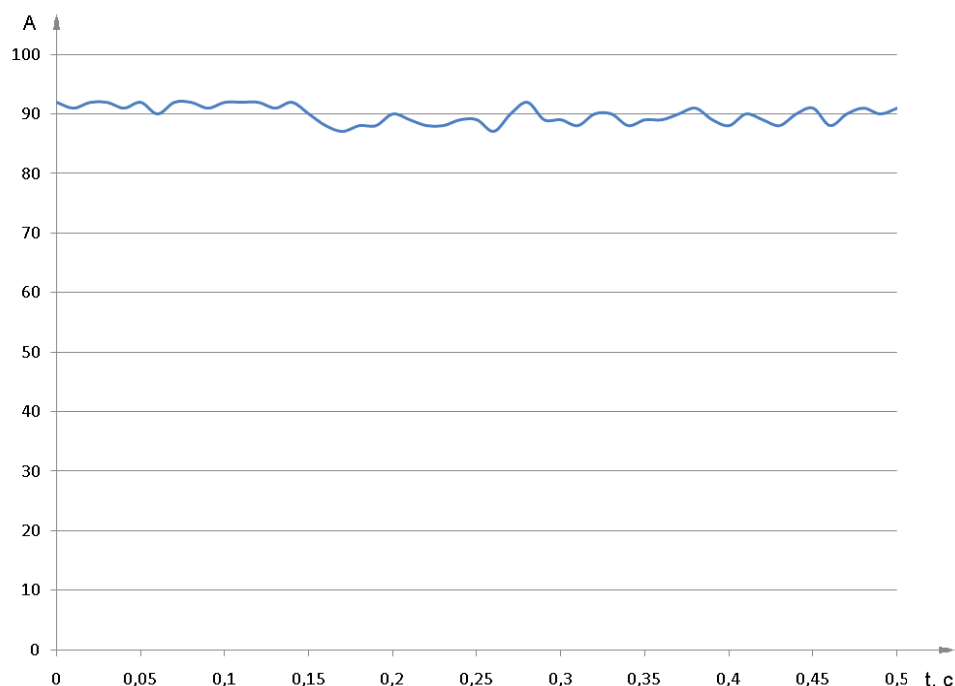


Рисунок 8 – Изменение амплитуды сигнала связанного с амплитудой механических колебаний в процессе формирования протяженного шва

Из графика видно, что относительная амплитуда пульсаций в установившемся режиме не превышает 5%.

Был разработан новый ультразвуковой аппарат для сварки термопластичных материалов с использованием чопперного регулятора напряжения и работающий по ПИД закону регулирования. Внешний вид аппарата представлен на рисунке 9.



Рисунок 9 – Внешний вид ультразвукового сварочного аппарата с чопперным регулятором напряжения

Были проведены сравнительные исследования качества сварки полиэтиленовых и лавсановых листовых материалов. На рисунке 10 представлен внешний вид сварных швов листового полиэтилена высокого давления (толщина – 36 мкм), полученных УЗ аппаратом с тиристорным регулятором напряжения. Поскольку материал имеет малую толщину, то

инерционность регулятора приводит к значительным перерегулированиям, и как следствие, к деструкции материала и ухудшению прочностных характеристик шва.

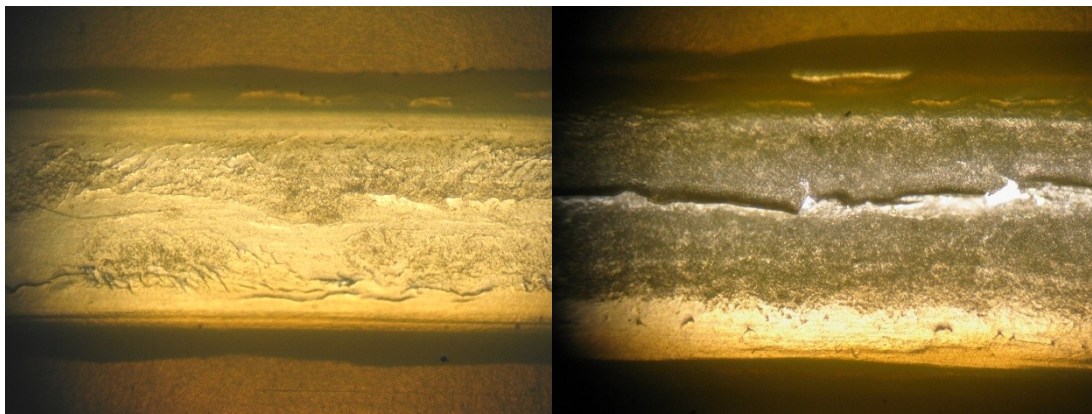


Рисунок 10 – Внешний вид сварного шва листового полиэтилена выполненного УЗ сварочным аппаратом с тиристорным регулятором

На рисунке 11 представлен внешний вид сварного шва этого же материала, но полученный УЗ аппаратом с чопперным регулятором. На рисунке 12 представлен внешний вид сварного шва многослойного листового лавсана. Данный аппарат обеспечивает более быстрое регулирование, и как следствие – постоянное качество сварного шва по всей длине, без появления коробления материала и деструкции.

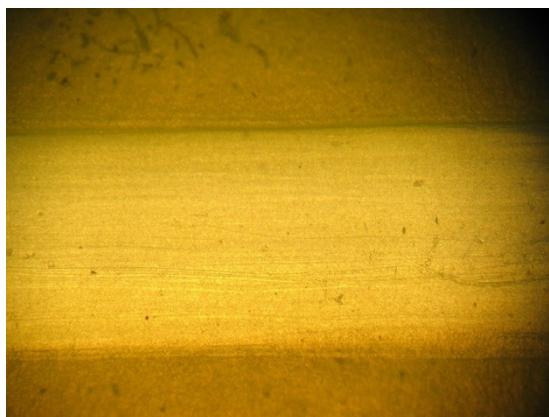


Рисунок 11 – Внешний вид сварного шва листового полиэтилена выполненного УЗ сварочным аппаратом с чопперным регулятором

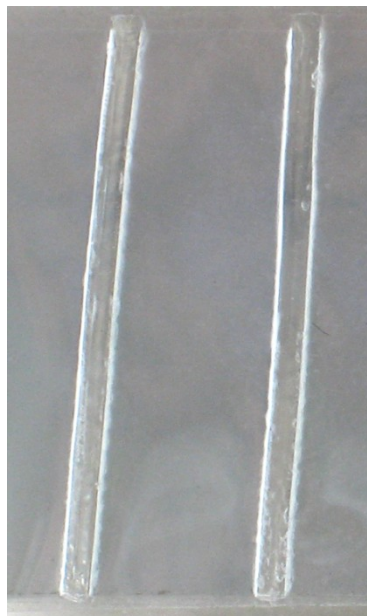


Рисунок 12 – Внешний вид сварного шва лавсановой полосы выполненного УЗ сварочным аппаратом с чопперным регулятором

Заключение

Высокая скорость протекания переходных процессов в чопперных регуляторах делает возможным применение ПИД законов регулирования, что в конечном итоге существенно улучшает управление электронным генератором, вызывая заметный рост такого показателя качества как скорость изменения напряжения питания УЗКС (в 50–100 раз), значительно снижает пульсации в установившемся режиме (4–6 раз), уменьшает продолжительность переходных процессов (3–5 раз).

На примере процесса сварки тонких листовых материалов показано повышение качества сварного шва по всей длине, а именно отсутствие участков с замятым материалом или следами деструкции. Таким образом, можно сделать вывод о целесообразности и перспективности применения подобных систем регулирования амплитуды колебаний в УЗ аппаратах.

Список литературы

[1] В.Н. Хмелев, Д. С. Абраменко, Р. В. Барсуков, Д. В. Генне Контроль параметров ультразвуковых технологических аппаратов. электронный журнал Техническая акустика.

[2] Б. Ю. Семенов — Силовая электроника

[1] <http://automation-system.ru/regulyator/type-of-control/75-dvuxpoziczionnye-regulatory.html>