

УДК 621.7

**В.Л. ДОБРОСКОК**, д-р техн. наук,  
**Я.Н. ГАРАЩЕНКО**, канд. техн. наук,  
**В.И. ВОРОНКОВ**, канд. техн. наук,  
**М.А. КАЛИБЕРДА**, Харків, Україна

## **МОДЕРНИЗАЦИЯ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПЛАЗМЕННОГО РАСКРОЯ ЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВОК МОД. «ХАРЬКОВ-П»**

В роботі представлено результати вдосконалення конструкції установки для плазмового розкрою листових заготовок мод. «Харків-П», що виготовляється на ПРАТ «Укроргверстатінпром» (Харків, Україна).

Зроблена спроба вдосконалити існуючу конструкцію установки, підвищивши технічні характеристики шляхом вибору нової схеми базування порталу і системи керування рухами з використанням мехатронних модулів.

В работе представлены результаты совершенствования конструкции установки для плазменного раскроя листовых заготовок мод. «Харьков-П», изготавливаемой на ЧАО «Укроргстанкинпром» (Харьков, Украина). Сделана попытка усовершенствовать существующую конструкцию установки, повысив технические характеристики путем выбора новой схемы базирования портала и системы управления движениями с использованием мехатронных модулей.

The results of plant construction improvement for plate stocks plasma cutting (model "Kharkov-P") are presented in that work. It has been manufactured in Private Company "Ukrorgstankinprom" (Kharkov, Ukraine). An attempt to improve the existing design of the plant is made through increasing the machine data by choosing a new scheme of gantry location and a control system of movements with using mechatronic modules.

### **Введение**

Технология плазменной резки разработана более 50 лет тому назад. Первые установки плазменной резки появились в 60-е годы прошлого столетия. Эти установки обладали рядом недостатков – большие габариты, низкая точность и высокая стоимость, поэтому приобретались только крупными промышленными предприятиями. В начале XXI века плазменное резание стало более доступным и получило более широкое

распространение в разных отраслях промышленности благодаря тому, что установки стали компактнее, дешевле и производительнее. Но постоянное повышение требований к точности раскроя листовых заготовок требует дальнейшего совершенствования конструкции таких установок [1-4].

В статье представлены результаты совершенствования конструкции установки для плазменного раскроя листовых заготовок мод. «Харьков-П», изготавливаемой на ЧАО «Укроргстанкинпром» (Харьков, Украина). Работа выполнялась на кафедре "Интегрированные технологии машиностроения" им. М.Ф. Семко Национального технического университета "Харьковский политехнический университет".

Модернизация существующей плазменной установки «Харьков-П» осуществлялась для повышения ее технических характеристик путем применения мехатронных модулей. Для разработки конструкторской документации и обеспечения рациональной модернизации установки проектирование осуществлялось на базе 3D моделирования в системе Solidworks. Для повышения точности резки была улучшена система управления и выполнен расчет коэффициентов для корректировки погрешности перемещений.

### **Особенности установки для плазменного раскроя «Харьков-П»**

Стационарная автоматизированная машина предназначена для плазменной вырезки деталей (без последующей обработки кромок под сварку) из листовой стали различных марок, а также сплавов на основе меди и алюминия. Точность и качество поверхности реза деталей соответствуют П1202, К1202 ГОСТ 14792.

Структура условного обозначения машины «М ППЛП» соответствует схеме приведенной в ГОСТ 5614-74 [5]: модернизированная машина (М); исполнение по конструктивной схеме - порталная (П); исполнение по способу резки - плазменная (Пл.); программируемая (П).

Основные характеристики установки.

Габаритные размеры обрабатываемого листа  $a \times b$ : 3000×2500 (±20) мм.

Максимальная толщина разрезаемого листа:

- для стали конструкционной углеродистой - 32 мм;
- для стали конструкционной легированной и алюминия - 25 мм.

Скорость резания в зависимости от толщины листа:

- для стали конструкционной углеродистой -  $5970 \div 130$  мм/мин;
- для стали конструкционной легированной -  $6080 \div 250$  мм/мин;
- для алюминия -  $6100 \div 125$  мм/мин.

Скорость резания при разрезании стальных листов толщиной до 20 мм -  $1120 \div 540$  мм/мин.

Скорость ускоренных перемещений суппорта ( $Y$ ) и портала ( $X$ ) – 20 000 мм/мин.

Погрешность повторения контура – до 0,1 мм.

Средства автоматизации - УЧПУ; Тип NC-210.

Режим работы - «Автомат».

Количество суппортов - 1 шт.

Вертикальный ход перемещения режущей головки - 250 мм.

Установленная мощность сервоприводов, не более - 2,4 кВт.

Установленная мощность генератора плазмы - 30 кВт.

Ширина колеи рельсового пути – 2 000 мм.

Энергоноситель процесса – воздух.

Давление рабочего газа -  $0,48 \div 0,85$  МПа.

Расход рабочего газа -  $208 \div 260$  л/мин.

Количество воздуха, удаляемого из рабочей зоны – до 5850 м<sup>3</sup>/час.

Габаритные размеры  $a \times b \times h \Rightarrow 4760 \times 2650 \times 1650$ .

Масса – 1 800 кг.

### **Конструкция и особенности работы основных частей установки**

Исполняющий механизм, перемещающийся по рельсовому пути (координата  $X$ ), является порталом, по направляющим которого перемещается каретка поперечно хода (координата  $Y$ ), с установленным на ней блоком плазменного резака.

Портал состоит из двух литых корпусных деталей, соединенных балкой и коробом. Портал перемещается по рельсовому пути на четырех катках, закрепленных на литых корпусных деталях. К корпусу портала крепится редуктор продольного хода.

Короб представляет собой сварную конструкцию, в которой расположены кабели и шланги, подводящие к каретке поперечного хода электроэнергию, рабочий газ и воду для охлаждения резака.

Выходные шестерни всех редукторов входят в зацепление с зубчатыми рейками рельсового пути. В конструкции редукторов предусмотрена автоматическая выборка люфтов в зубчатых зацеплениях, возникающих в результате погрешностей изготовления и износа. Выборка люфтов достигается посредством разворота одной цепи редуктора относительно другой с помощью пружин и кулачка. Редукторы продольного хода соединены с приводом посредством промежуточных валов и мембранных муфт. Привод продольного хода состоит из двухступенчатого редуктора и электродвигателя.

Балка портала на концах имеет цапфы для крепления к корпусным деталям портала. Блок плазменного резака размещается на каретке поперечного хода, перемещающейся по направляющим портала при помощи привода состоящего из безлюфтового редуктора и электродвигателя. На каретке расположен суппорт обеспечивающий подъем - опускание блока резака (по координате Z). Привод подъема суппорта состоит из электродвигателя и трехступенчатого редуктора с самотормозящей червячной парой.

Рельсовый путь монтируется из направляющих кареток. Крепление рельсов и регулировка в горизонтальной плоскости осуществляется с помощью болтов и резьбовых втулок. К рельсам крепятся зубчатые рейки для перемещения портала машины.

Подвод питания к машине осуществляется по кабелям и шлангам, расположенным в двухрядной цепи. Эта цепь собрана из штампованных звеньев.

Для поддержания постоянного зазора между резаком и поверхностью листа, на каретке установлен стабилизатор высоты, автоматически управляющий приводом.

Блок микроплазменного резака состоит из резака и кабель-шланга для подведения плазмообразующего газа и тока режущей дуги.

Блок управления установлен на правой стороне корпуса портала. В блоке управления расположены следующие элементы:

- устройство ЧПУ, хранящее исходную информацию, выполняющее расчет параметров движения и технологические команды, выдающее и выполняющее анализ путевой информации (запись программы осуществляется в форматах ESSI и ISO);

- пульт управления;
- блоки приводов (серво-усилители);
- система электропитания;
- блок питания.

На коробе портала закреплена установка для плазменной резки РС – 100.

В комплект поставки машины входит безлюфтовая чертилка. Для тестового прочерчивания чертилка крепится вместо резака. Она предназначена для отладки программы путем прочерчивания заданного контура на поверхности заготовки.

### **Структурная схема организации управления перемещением резака**

Реализация управления перемещением резака осуществлялась с помощью мехатронных модулей.

Использовались сервоприводы ECS которые сконструированы для обеспечения высокодинамичных многоосевых перемещений. В системах Lenze точная синхронность многоосевых скоординированных движений достигается математической обработкой синхронных участков рабочих позиций с циклом менее 1 мс. ECS оптимизированы для порталных систем, робототехники, манипуляторов и упаковочных машин (рис. 1) [6].

Преимущества сервосистемы ECS:

- осевые модули выдерживают перегрузку до 200%;
- обмен энергией по общей шине постоянного тока;
- общие модули источника питания;
- упрощенная установка и монтаж;
- гибкая конфигурация для адаптации под заданные условия.

Для реализации структурной схемы использовали элементы, выбранные из каталога «СВ Альтера» [7].

Рассматриваемый мехатронный модуль состоит из следующих компонентов:

- Трехфазный асинхронный двигатель серии Lenze Small Drive тип 13.710.55 мощностью 90 Вт, 2700 об/мин.
- Планетарный редуктор SPL 42-2NVCR передаточное отношение  $i = 13.73$ , максимальный крутящий момент  $M_{max} = 7.5 \text{ Н}\cdot\text{м}$ .
- Преобразователь частоты ПЧ Lenze 8200 Vektor мощностью 250 Вт.

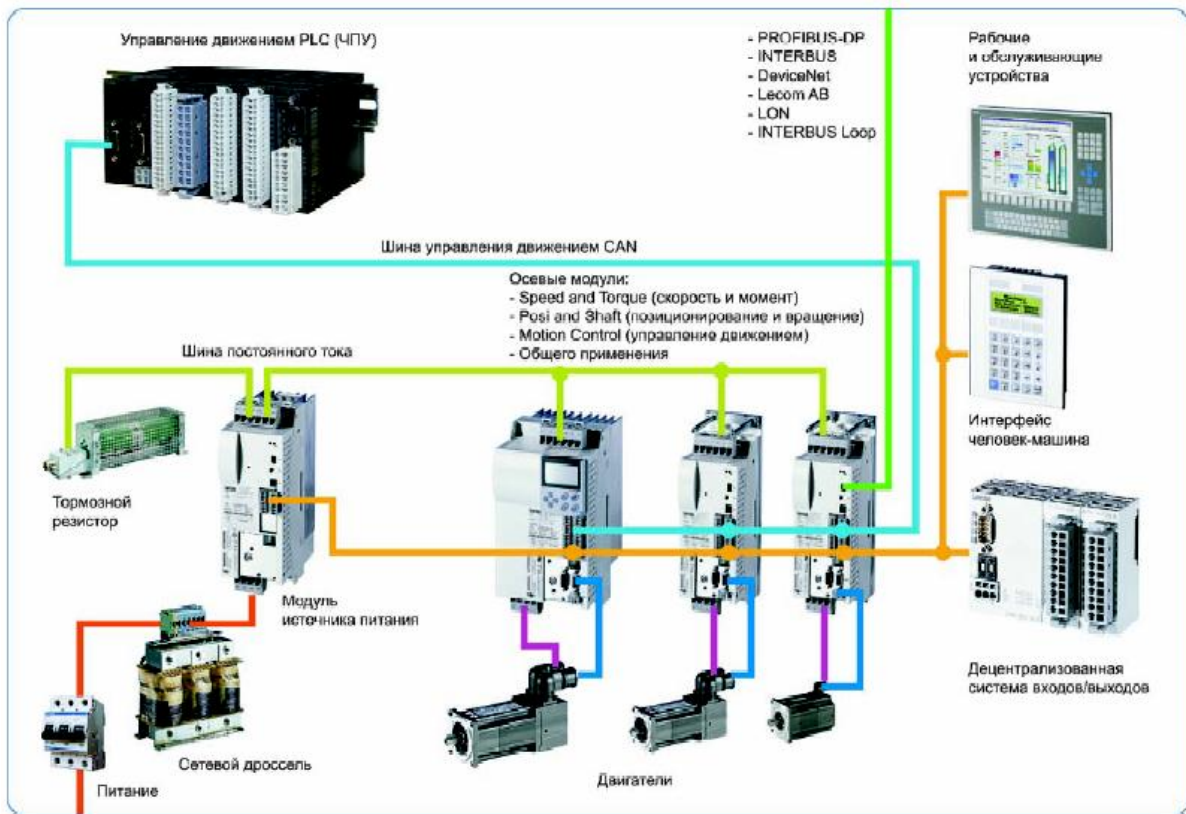


Рисунок 1 – Мехатронные модули

### Анализ конструкции прототипа установки плазменной резки «Харьков-П»

В ходе анализа конструкции прототипа «Харьков-П» на ЧАО «Укроргстанкинпром» был рассмотрен механизм продольного перемещения портала (схема представлена на рис. 2) для оценки погрешности позиционирования по координате X.

На рис. 3 приведена модель механизма продольного перемещения существующей плазменной установки.

Приводом данного механизма служит мехатронный модуль Lenze GRA02 2S GSN 09 HN41 7, корпус которого закреплен на плите, прикрепленной к уголку каретки. Ролики 5 каретки 1 установленные с зазором  $h$ , перемещаются по направляющему рельсу 3. Каретка 2 приходит в движение от мотор-редуктора 7 через вал 8. На каретки устанавливается

портал для продольного перемещения резака. При первом запуске вал 8 соединяющий каретки перемещается перпендикулярно направляющим рельсам, но при смене движения направления конец вала, от которого приходит в движение каретка 2 начинает запаздывать из-за зазора  $h$  с которым установлены ролики 5 каретки 1. Следовательно, возникает перекося вал, а с ним и погрешность позиционирования  $\Delta/2$ . При последующей смене направления движения погрешность удваивается и составляет  $\Delta$ .

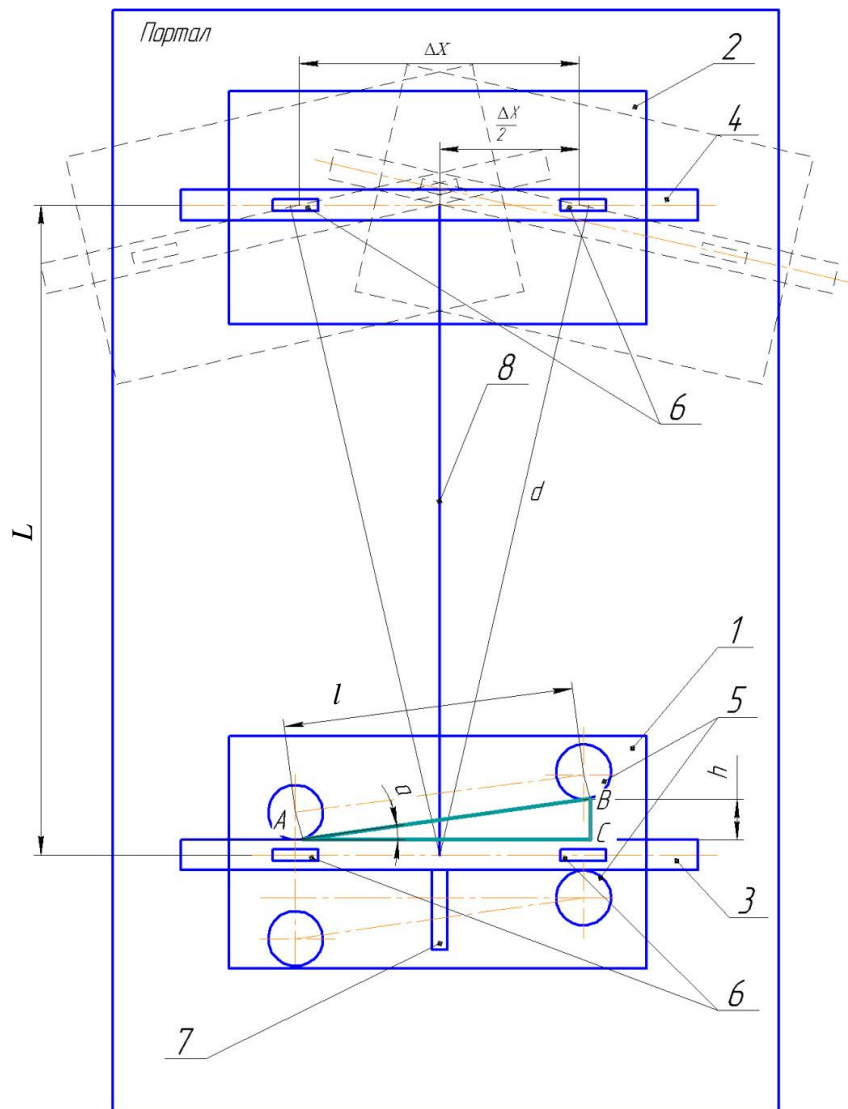


Рисунок 2 – Схема механизма продольного перемещения портала:  
 1 – каретка левая; 2 – каретка правая; 3 – рельс левый; 4 – рельс правый;  
 5 – ролик боковой; 6 – ролик верхний; 7 – мехатронный модуль; 8 – вал

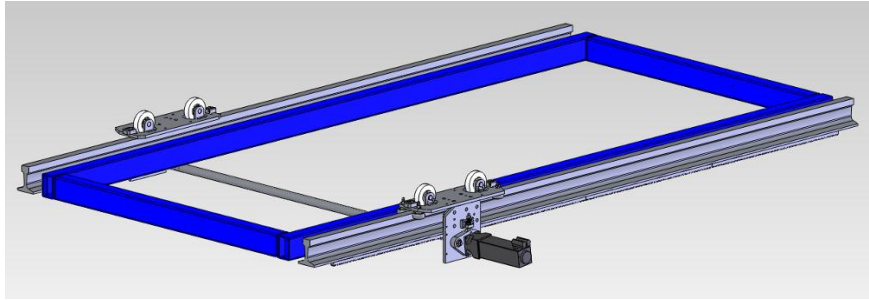


Рисунок 3 – Общий вид механизма продольного перемещения существующей плазменной установки «Харьков-П»

Для расчета погрешности позиционирования рассмотрим прямоугольный треугольник  $ABC$ . Принимаем  $BC = h$ ,  $AB = l$  (расстояние от центра ролика до оси вала). Угол  $\alpha$  – перекос роликов 5 относительно рельса  $l$ . Проведем перпендикулярный отрезок  $d$  к отрезку  $AB$  до пересечения с осью рельса 4 и полученное расстояние от отрезка  $d$  до оси вала и будет погрешностью  $(\Delta/2)$ . Полная погрешность составляет удвоенное расстояние от отрезка  $d$  к оси вала.

Для расчета погрешности перемещения по координате  $X$ , определим угол перекоса роликов по следующей известной зависимости:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{h}{l}\right), \quad (1)$$

где  $h$  – зазор установки роликов,  $h = 0.05$  мм;

$l$  – расстояние от центра ролика до оси вала,  $l = 280$  мм.

$$\Delta = 2L \sin \alpha = 2h \frac{L}{l}, \quad (2)$$

где  $L$  – расстояние между рельсами,  $L = 2000$  мм.

Расчетная погрешность позиционирования с учетом значений параметров установки составляет  $\Delta \approx 0,72$  мм. Такая величина погрешности определяет существующую плазменную установку до 2-го класса точности в соответствии с ГОСТ 5614-74 «Машины для термической резки металлов. Типы, основные параметры и размеры».

В результате анализа существующей конструкции мод. «Харьков-П» выявлено следующие недостатки: конструкция имеет люфты, низкую жесткость, существенную погрешность позиционирования; достаточно



сложную предварительную настройку установки, недостаточно продолжительный срок эксплуатации.

Для уменьшения погрешности позиционирования по координате  $X$  был предложен механизм выборки люфтов компенсирующей пружиной. Модернизированный механизм продольного перемещения портала представлен на рис. 4. Центр установочного поворота мехатронного модуля размещен в делительной плоскости рейки. Это обеспечило отсутствие крутящего момента способствующего перекосу и соответственно снижение погрешности позиционирования.

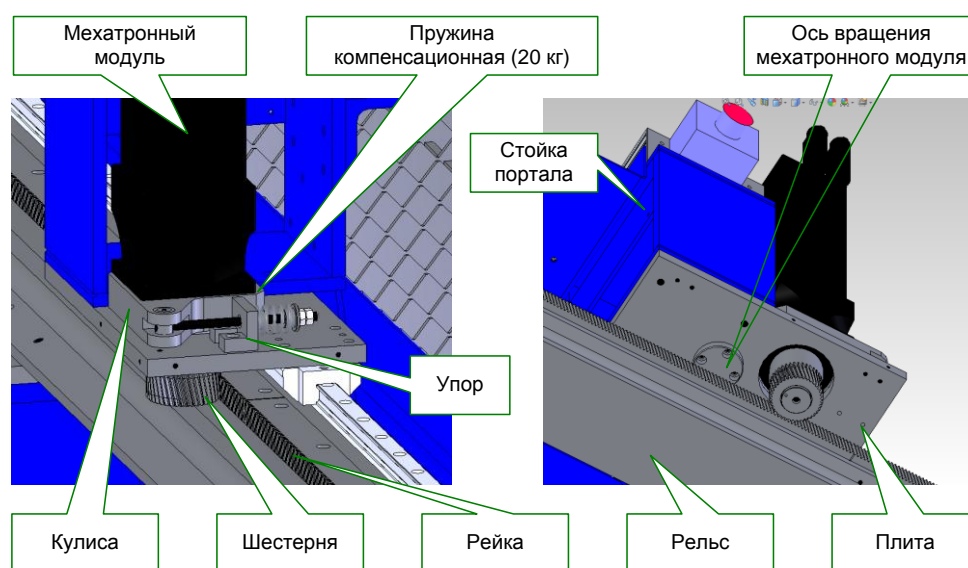


Рисунок 4 –Выборка люфтов в механизме продольного перемещения портала

В качестве аппарата плазменной резки использован источник Hypertherm Powermax 1650. Данный источник является наиболее эффективным и мощным аппаратом плазменной резки с помощью воздуха в сегменте продукции компании Hypertherm для резки листового металла толщиной до 32 мм. Ток плазмы можно регулировать в достаточно больших пределах до 100 А. При использования режима непрерывной резки (без выключения вспомогательной дуги) возможна резка различных сетчатых конструкций.

Пневмосистема установки служит для опускания / поднятия плазменной горелки и подвода воздуха в качестве плазмообразующего газа.

Подача сжатого воздуха осуществляется из заводской магистрали или автономного компрессора. Для поддержания давления воздуха используется редукционный клапан, контроль заданного давления осуществляется манометром.

На рис. 5 представлен резак плазменной резки и емкостной датчик.



Рисунок 5 – Резак плазменной резки

Система управления мехатронными модулями перемещения рабочего органа установки

В модернизированной установке использовались мехатронные модули для установок с числовым программным управлением. Проведен расчет ПИ-регулятора для управления двигателем постоянного тока.

Параметры цифрового регулятора перемещений рабочего органа и другие параметры системы выбирались с точки зрения их аппаратной реализуемости. Цифровым системам управления присущи физические ограничения, определяемые дискретными процессами и элементами, которые отсутствуют в аналоговых системах. Например, период квантования в цифровых системах управления задается таймером и зависит от скорости выполнения процессором арифметических операций и инструкций. Поэтому аппаратное обеспечение цифровой системы управления накладывает ограничения на частоту квантования [8].

Другими ограничениями при проектировании цифровой системы управления является конечная длина слова. Длина слова в большинстве микропроцессоров - 8 бит.

Рассмотрим некоторые аспекты программирования реальной системы на основе микропроцессорного устройства. Возможный вариант использования микропроцессора (МП) в качестве регулятора показан на рис. 6. В этом случае объект управления представлен двигателем постоянного тока (ДПТ), нагрузкой и усилителем мощности (УМ). Аналоговый объект и микропроцессор связаны через аналого-цифровой (АЦП) и цифро-аналоговый (ЦАП) преобразователи. Таким образом, вся система должна рассматриваться как цифровая система управления с периодом квантования  $T$  секунд [9].

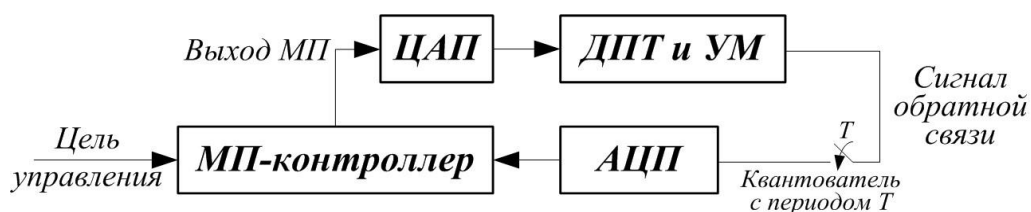


Рисунок 6 – Структурная схема микропроцессорной системы управления исполнительным электродвигателем

В принятой микропроцессорной системе управления двигателем для определения начала следующего периода квантования применен аналоговый программный таймер, который вырабатывает импульс каждые  $T$  секунд.

Управление двигателем постоянного тока с помощью ПИ-регулятора реализовано микропроцессорной программой. На начальной стадии решения задачи ПИ-регулятор описывается дифференциальным уравнением. Затем это уравнение приводится к дискретной функции с применением одного из приближенных численных методов и программируется на языке микропроцессора [10].

### **Моделирование модернизированной установки для плазменного раскроя листовых заготовок мод. «Харьков-П1»**

Проектирование всех механизмов установки «Харьков-П1» осуществлялось 3D моделированием в системе SolidWorks.

Одним из самых главных узлов плазменной установки является стол, состоящий из 195 деталей. Стол представляет собой разборную конструкцию для удобства транспортировки. Он имеет быстросменные ребра жесткости, на которые укладывается разрезаемый металл. По мере выгорания ребер жесткости их можно менять местами, прежде чем возникнет необходимость замены, что резко сокращает затраты на эксплуатацию. По обеим сторонам стола расположены рельсовые направляющие для горизонтальной  $X$  координаты перемещения резака. На правом рельсе расположены путевые выключатели, ограничивающие перемещение резака по (координате  $X$ ). На рис. 7 представлена регулировка рельса: в горизонтальном (болт 1) и вертикальном (болт 2) направлениях. Такой подход позволил существенно упростить монтаж и регулировку установки.

На рис. 8 представлена 3D модель стола плазменной установки «Харьков-П1».

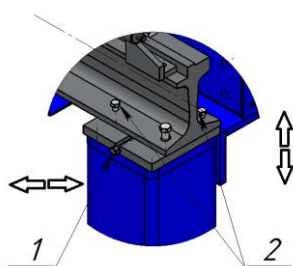


Рисунок 7 – Схема регулировки рельса



Рисунок 8 – Стол плазменной установки «Харьков-П1»

Не менее важным узлом плазменной установки является портал для продольного перемещения резака, состоящий из 108 деталей. Портальные направляющие устанавливаются вдоль стола. Длина направляющих определяет максимальную длину разрезаемого листа (координата  $X$ ). На практике, при большой загрузке установки, рекомендуется выбирать общую длину по координате  $X$  в два раза меньше длины разрезаемого листа. Во время выполнения раскроя на одной половине машины, на другой половине можно снимать детали и устанавливать новый листовой материал.

Портал передвигается вдоль стола по порталным направляющим. Длина портала определяет максимальную ширину разрезаемого листа (координата  $Y$ ). На лицевой стороне портала также крепятся путевые выключатели, ограничивающие перемещение резака. В торцах портала установлены кнопки аварийного выключения установки.

Портал приводится в движение двумя согласованными мехатронными модулями (рис. 9). Точность его позиционирования составляет  $\pm 0,10$  мм/м.

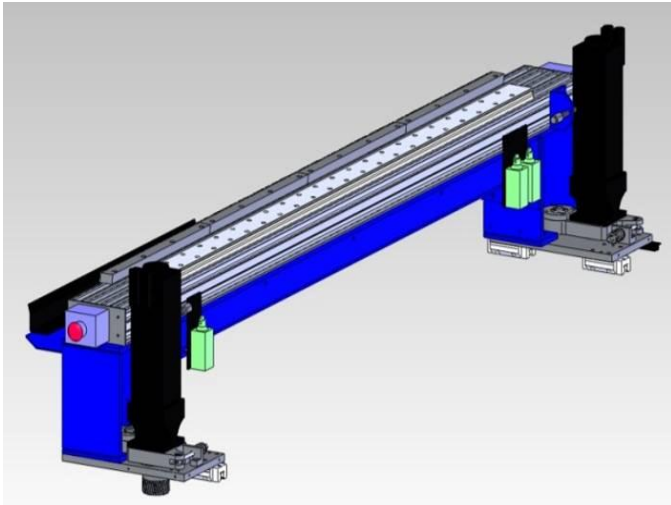


Рисунок 9 – Портал с двумя мехатронными модулями

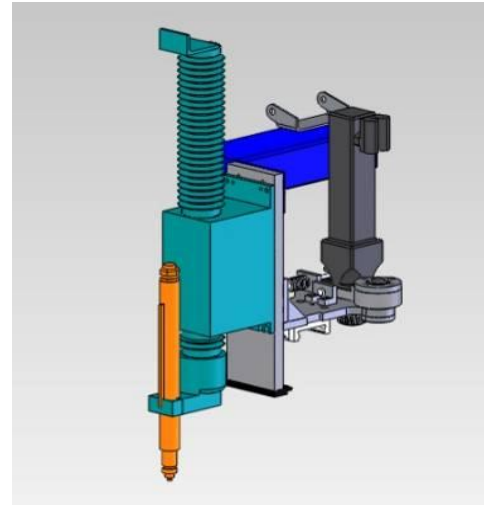


Рисунок 10 – 3D модель суппорта

Поперечное перемещение резака в установке обеспечивается суппортом. Суппорт состоит из 35 деталей. Суппорт перемещается вдоль портала с помощью мехатронного модуля (координата  $Y$ ). На суппорте установлен держатель плазмотрона, система MSX-750 CAP предназначенная для его вертикального перемещения (координата  $Z$ ) и слежения за постоянством зазора. Трехмерная модель суппорта представлена на рис. 10.

Для установки была спроектирована специальная дымоотводящая шлаковая ванна, в состав которой входят 73 детали. Дым, образующийся в процессе резки, отводится из-под всей поверхности рабочего стола с помощью воздуховода, что исключает попадание продуктов горения в помещение. Шлаковая ванна крепится поводками на торцах портала. Совместное перемещение портала и шлаковой ванны дает возможность

отводить большую часть продуктов сгорания образующихся при раскрое. На рис. 11 представлена трехмерная модель шлаковой ванны.

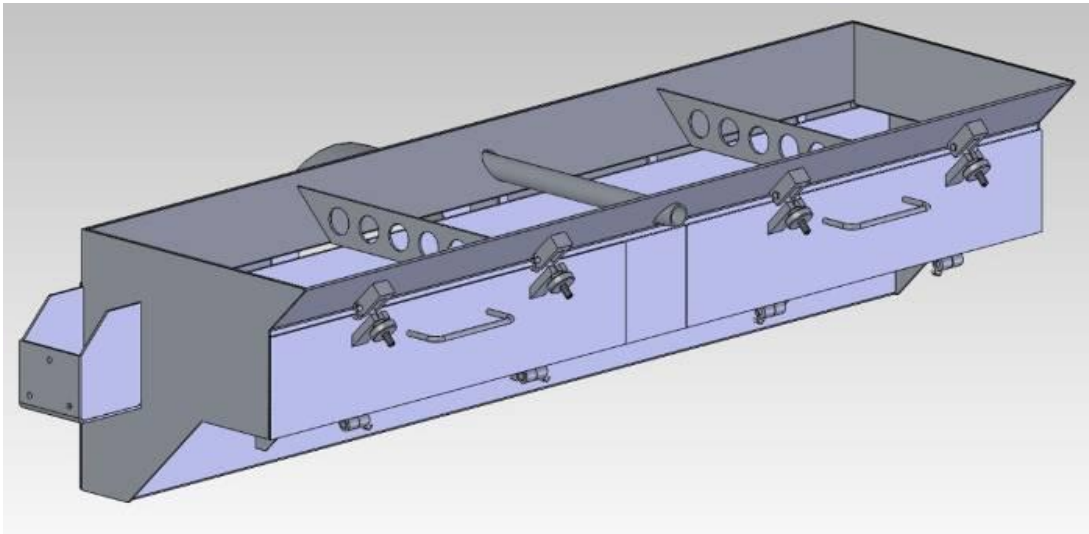


Рисунок 11 – 3D модель шлаковой ванны

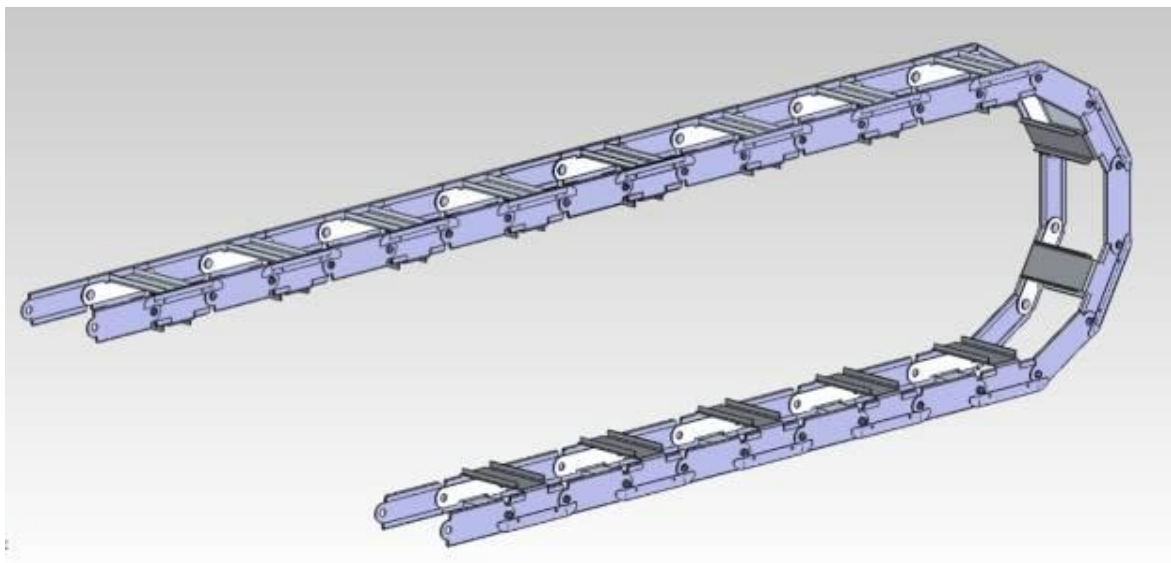


Рисунок 12 – 3D модель кабельной цепи суппорта-стола

Создана модель патрубка предназначенного для соединения приемника (из которого выходят продукты горения) с централизованной вытяжкой и системой фильтрации газов вредных для здоровья оператора.

Предусмотрены две кабельные цепи предназначенные для защиты

электрических кабелей, гидравлических и пневматических шлангов, соединенных с подвижными частями оборудования. Кабельные цепи, отличаются между собой только длиной. В цепи соединяющей суппорт с порталом 21 звено, а в цепи соединяющей портал со столом 31 звено. Трехмерная модель цепи портала-стола представлена на рис. 12.

Для поддержки трубы TR01 в установке предусмотрена струна  $\varnothing 4$  мм, которая расположена под рабочей частью стола и натянута между двумя тягами, закрепленными на патрубке и кронштейне. На струне через пружинное кольцо крепятся хомуты, которые не дают провисать трубе TR01.

### **Проектирование сборки плазменной установки**

При проектировании прототипа плазменной установки был использован метод "снизу вверх". Созданные детали и сборочные единицы были помещены в общую сборку с наложением между ними сопряжений (рис. 13, 14).

Базовой деталью в общей сборке является стол, поэтому наложение сопряжений начинали со стола. Последующее сопряжение всех составляющих деталей и сборочных единиц выполнялось с учетом последовательности сборки установки.

Созданная 3D модель модернизированной установки мод. «Харьков-П1» представлена на рис. 14.

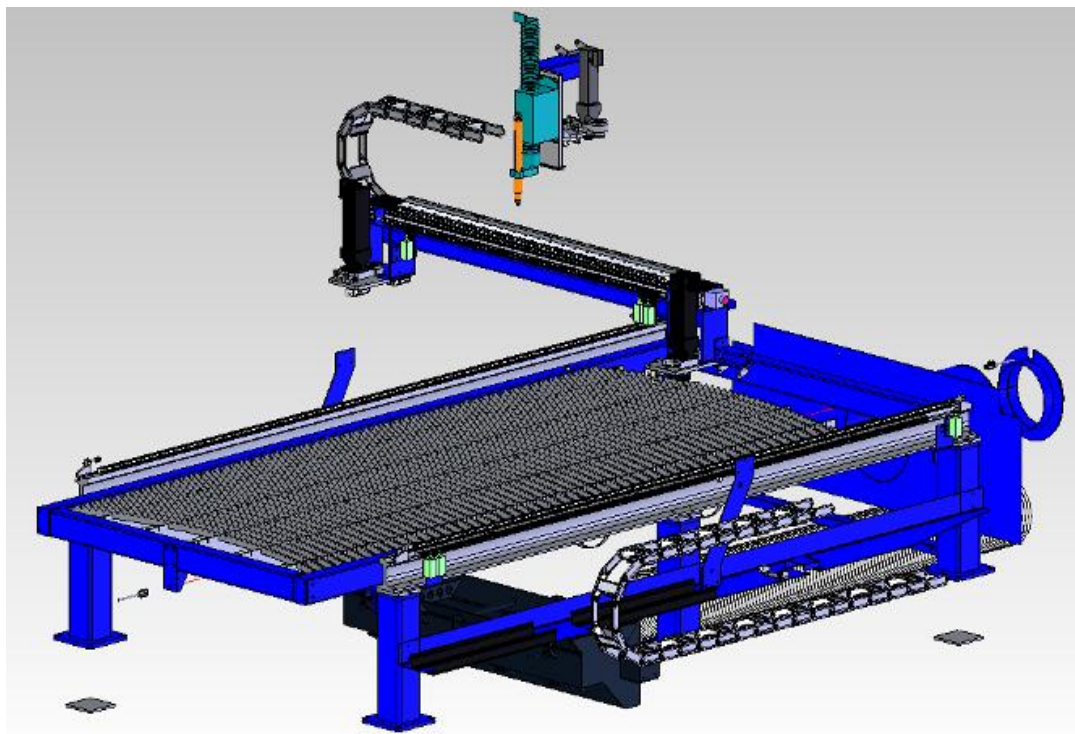


Рисунок 13 – Плазменная установка без наложения сопряжений

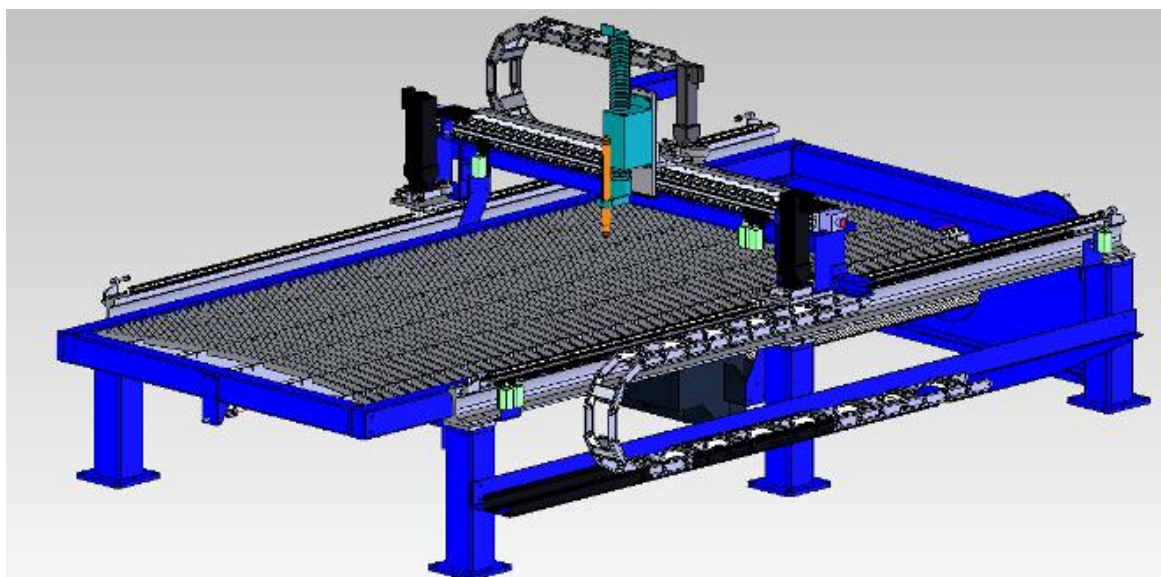


Рисунок 14 – 3D модель плазменной установки мод «Харьков-П1»

### **Выводы**

Выполнен анализ конструкции прототипа установки плазменной резки "Харьков-П". Проведен расчет коэффициентов для корректировки погрешности перемещений. Рассмотрена система управления мехатронными модулями перемещения рабочего органа установки.

Повышение точности плазменной резки обеспечивается модернизацией конструкции установки и выбором рациональной системы управления рабочими перемещениями.

Для решения поставленной задачи разработана в CAD системе SolidWorks 3D модель установки «Харьков-П1». В усовершенствованной модели устранены недостатки, связанные с недостаточной точностью позиционирования за счет выборки люфтов в механизме продольного перемещения портала.

**Список использованных источников:** 1. *Ширшов И.Г., Котиков В.Н.* Плазменная резка. - М.: Машиностроение, 1987. - 226 с. 2. *Быховский Д.Г.* Плазменная резка. - М.: Машиностроение, 1972. - 327 с. 3. О сварке. Информационный сайт. WEB: <http://www.osvarke.com/mashiny-plazmennoj-rezki.html>. 4. *Клюев А.С.*, Монтаж приборов, средств автоматизации и слаботочных устройств. - М.: Стройиздат, 1978.- 512 с. 5. ГОСТ 5614-74. Библиографическое описание документа. ГОСТ 5614-74 Машины для термической резки металлов. Типы, основные параметры и размеры. - М.: Изд-во стандартов, 1974. - 5 с. 6. *Егоров О.Д., Подураев Ю.В.* Мехатронные модули. Расчет и конструирование: Учебное пособие. - М.: МГТУ «СТАНКИН», 2004. - 360 с. 7. *С.В. Альтера* Электротехника & автоматизация, 1998. - 352 с. 8. *Гостев В.И.* Системы управления с цифровыми регуляторами: Справочник. - К.: Техника, 1990. – 280 с. 9. *Куо Б.* Теория и проектирование цифровых систем управления: Пер. с англ.- М.:



Машиностроение, 1986. – 448 с. **10.** Ацюковский В.А. Емкостные дифференциальные датчики перемещения. - М.: Госэнергоиздат, 1960. - 105 с.

**Bibliography (transliterated):** **1.** Shirshov I.G., Kotikov V.N. Plazmennaja rezka. - М.: Mashinostroenie, 1987. - 226 s. **2.** Byhovskij D.G. Plazmennaja rezka. - М.: Mashinostroenie, 1972. – 327 s. **3.** О сварке. Информационный сайт. WEB: <http://www.osvarke.com/mashiny-plazmennoj-rezki.html>. **4.** Kljuev A.S., Montazh priborov, sredstv avtomatizacii i slabotochnyh ustrojstv. - М.: Strojizdat, 1978.- 512 s. **5.** GOST 5614-74. Bibliograficheskoe opisanie dokumenta. GOST 5614-74 Mashiny dlja termicheskoj rezki metallov. Tipy, osnovnye parametry i razmery. - М.: Izd-vo standartov, 1974. - 5 s. **6.** Egorov O.D., Poduraev Ju.V. Mehatronnye moduli. Raschet i konstruirovanie: Uchebnoe posobie. - М.: MGTU «STANKIN», 2004. - 360 s. **7.** S.V. Al'tera Jelektrotehnika & avtomatizacija, 1998. - 352 s. **8.** Gostev V.I. Sistemy upravlenija s cifrovymi reguljatorami: Spravochnik. - К.: Tehnika, 1990. – 280 s. **9.** Kuo B. Teorija i proektirovanie cifrovyh sistem upravlenija: Per. s angl.- М.: Mashinostroenie, 1986. – 448 s. **10.** Ацюковский В.А. Емкостные дифференциальные датчики перемещения. - М.: Госэнергоиздат, 1960. - 105 с.