

Сухоруков С. И., Годяев А. И., Овсянников А. Р.
S. I. Sukhorukov, A. I. Godyaev, A. R. Ovsyannikov

РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА ТРЁХМЕРНОЙ ПЕЧАТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

DEVELOPMENT OF A CONTROL SYSTEM STRUCTURE FOR A ROBOTIC COMPLEX FOR 3D PRINTING METAL PRODUCTS

Сухоруков Сергей Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Россия, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, 27; тел. 8(929)407-39-49. E-mail: sukhorukov@knastu.ru.

Sergei I. Sukhorukov – PhD in Engineering, Associate Professor, Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Russia, Komsomolsk-on-Amur, Lenin str., 27; tel. 8(929)407-39-49. E-mail: sukhorukov@knastu.ru.

Годяев Александр Иванович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматика, телемеханика и связь» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск); тел. 8(984)286-17-25. E-mail: zav_at@festu.khv.ru.

Alexander I. Godyaev – Doctor of Engineering, Professor, Head of Automatic Telemechanics and Communication Department, Far Eastern State Transport University (Russia, Khabarovsk); tel. 8(984)286-17-25. E-mail: zav_at@festu.khv.ru.

Овсянников Антон Романович – студент Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 8(914)186-35-88. E-mail: anton.mark.kms@gmail.com.

Anton R. Ovsyannikov – Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(914)186-35-88. E-mail: anton.mark.kms@gmail.com.

Аннотация. Работа посвящена разработке структуры системы управления роботизированного комплекса трёхмерной печати металлических изделий. Проведён краткий обзор существующих технологий трёхмерной печати металлических изделий, в котором отражены их основные особенности. В рамках обзора также проанализированы основные преимущества и недостатки различных технологий, что позволило обосновать выбор технологии Direct Energy Deposition для дальнейшей реализации. Определены основные функции оборудования комплекса, которые должны выполняться для реализации выбранной технологии печати. Приведена функциональная схема роботизированного комплекса, реализующего выбранную технологию. В соответствии с особенностями приведённой функциональной схемы определены необходимые функции системы управления роботизированного комплекса. Разработаны два варианта структуры системы управления, отличающиеся распределением элементов по уровням иерархии: структура с главным устройством в виде контроллера робота и структура с главным устройством в виде отдельного ПЛК. Проведён анализ вариантов структуры. Сделан выбор варианта для дальнейшей разработки роботизированного комплекса.

Summary. The work is devoted to the development of the structure of the control system for a robotic complex for three-dimensional printing of metal products. A brief review of existing technologies for three-dimensional printing of metal products is carried out, which reflects their main features. The review also analyzed the main advantages and disadvantages of various technologies, which made it possible to justify the choice of Direct Energy Deposition technology for further implementation. The main functions of the complex equipment that must be performed to implement the selected printing technology are determined. A functional diagram of a robotic complex that implements the selected technology is presented. In accordance with the features of the given functional diagram, the necessary functions of the control system of the robotic complex are determined. Two variants of the control system structure have been developed, differing in the distribution of elements across hierarchy levels: a structure with a main device in the form of a robot controller and a structure with a main device in the form of a separate PLC. An analysis of the structure options was carried out. A choice has been made for the further development of the robotic complex.

Ключевые слова: роботизированный комплекс, трёхмерная печать металлами, система управления, структура, вариант структуры, уровни иерархии.

Key words: robotic complex, metal 3D printing, control system, structure, variant of structure, hierarchy levels.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 22-79-00267, <https://rscf.ru/project/22-79-00267/>.

УДК 681.5

Введение. Производство металлических изделий в промышленности осуществляется преимущественно по двум технологиям: литьё и механическая обработка. Для этих методов характерны ограниченные возможности построения сложных структур внутри детали и большой расход материала. Одним из возможных вариантов решения данных проблем являются разработка и внедрение аддитивных технологий в производство [1; 2; 3; 4]. При этом важным ограничением для внедрения аддитивных технологий в промышленное производство являются итоговые габариты изделия. Анализ существующих решений показывает, что имеющиеся системы печати металлических изделий обладают весьма ограниченными размерами конечного изделия – порядка 0,5×0,5×0,5 м. Это затрудняет изготовление крупногабаритных изделий с применением аддитивных технологий.

В качестве одного из перспективных вариантов решения данной проблемы на сегодня является разработка технологических комплексов трёхмерной печати, применяющих различные варианты механики для обеспечения повышенных габаритов рабочей зоны печати. Так, например, предприятием НИТИ «Прогресс» был разработан роботизированный комплекс трёхмерной печати на базе антропоморфного робота собственного производства, выполняющий наплавку с применением электронного луча [5]. К недостаткам такого решения можно отнести следующие аспекты:

- необходимость расположения комплекса в вакуумной камере больших габаритов, что требует высоких капитальных затрат для внедрения комплекса, а также необходимость в высококвалифицированном персонале, выполняющем обслуживание данной установки. Также в случае ошибок в программе перемещений могут возникать повреждения стенок камеры, что приведёт к аварии и порче заготовки;

- применение робота собственной разработки, выпускаемого в штучном или мелкосерийном исполнении, что приводит к сложности подготовки персонала для работы с данным роботом и к высокой стоимости оборудования.

В качестве альтернативного варианта, позволяющего компенсировать вышеозвученные недостатки, в Комсомольском-на-Амуре государственном университете разрабатывается роботизированный комплекс на базе серийного промышленного робота-манипулятора, не требующий для работы применения вакуумной камеры. Применение серийного массово производимого робота позволяет обеспечить снижение капитальных затрат на внедрение комплекса и снижает требования к подготовке персонала комплекса, что в дальнейшем позволит снизить количество ошибок и повысить процент выхода годных изделий. Применение источников энергии, отличных от электронного луча, позволяет вместо сложной и дорогостоящей вакуумной камеры для работы комплекса использовать более простые защитные ограждения. Конкретная техническая реализация такого комплекса может быть различной и будет зависеть от применяемой технологии печати и оборудования. Однако, независимо от применяемой технологии, в рамках разрабатываемого комплекса потребуется обеспечивать совместную работу разнородного оборудования, что потребует разработки системы управления комплекса. Системы управления в подобных случаях могут характеризоваться значительной сложностью [6]. В рамках представленной работы решается задача разработки структуры системы управления роботизированного комплекса, обеспечивающего печать трёхмерных крупногабаритных изделий.

Анализ технологий трёхмерной печати. На начальном этапе разработки авторами был выполнен обзор научно-технических публикаций, в результате которого были выявлены основные существующие на сегодняшний день технологии трёхмерной печати металлами. К ним относятся технологии: SLM (селективного лазерного спекания) или DMLS (прямого лазерного спекания металлов), 3DP (струйной трёхмерной печати), LOM (изготовление методом ламинирования), DED (прямой подвод энергии и материала). Все эти технологии формируют итоговое изделие послойно, но с применением различных вариантов исходных материалов и способов нанесения слоя.

Так, технологии 3DP, SLM, DMLS основаны на применении металла в виде порошка [7; 8; 9; 10], спекаемого лазерным лучом, и отличаются у этих технологий только способы доставки порошка и формирования геометрии слоя. Несмотря на возможность печати с высокой детализацией, применение таких технологий в рамках роботизированного комплекса затруднено в связи с трудностью доставки порошка в место печати.

Технология LOM основана на применении тонколистового металла, который вырезается по форме текущего слоя, после чего такие вырезки свариваются с применением специального источника энергии (ультразвукового или лазерного) [11; 12]. Такой подход также не рекомендуется к реализации в рамках роботизированного комплекса в связи со сложностью разработки оснастки для работы с тонколистовыми «срезами» слоёв.

В технологии DED [13] используется металл в виде проволоки, который наплавляется лазерным лучом в нужных местах на поверхность предыдущего слоя. Такая форма металла является наиболее удобной для доставки в зону печати, а также позволяет использовать распространённые расходные материалы (сварочные проволоки) и менять материал в процессе печати (например, для нанесения защитных слоёв).

Следует отметить, что, помимо перечисленных основных технологий, также разрабатываются различные варианты гибридных технологий, объединяющих в себе несколько различных подходов одновременно [14; 15; 16].

С учётом вышеизложенного для дальнейшей реализации в рамках роботизированного комплекса была выбрана технология DED.

Структура роботизированного комплекса трёхмерной печати по технологии DED. Для реализации выбранной технологии оборудование, входящее в состав роботизированного комплекса, должно обеспечивать выполнение следующих функций:

- подачу исходного материала (проволоки) с программно задаваемой скоростью, ускорением и количеством (длиной);
- генерацию лазерного излучения для расплавления проволоки с программным управлением режимами работы лазера (мощность, длительность, наличие импульсов и т. д.);
- перемещение печатающей оснастки, закреплённой на промышленном роботоманипуляторе, по координатам в пространстве, заданным в управляющей программе печати;
- формирование защитной атмосферы в зоне печати;
- обеспечение функций безопасности комплекса в целом, в том числе активной безопасности в случае выхода лазерного луча за зону печати.

Помимо указанных функций, непосредственно требующихся для реализации технологии печати, также было предложено обеспечить возможность варьирования геометрических параметров наносимого слоя (ширину и высоту наплавляемого за один проход валика) металла без смены диаметра проволоки. Для этого необходима реализация функции программно управляемого позиционирования проволоки относительно лазерного луча (приближение или удаление от точки фокуса лазера, изменение угла наклона проволоки к лазеру).

В соответствии с данными функциями была сформирована функциональная схема роботизированного комплекса трёхмерной печати металлами, реализующая печать по технологии DED, приведённая на рис. 1. На рис. 1 сплошными стрелками показаны информационные связи между элементами, а пунктирными стрелками – механические связи.

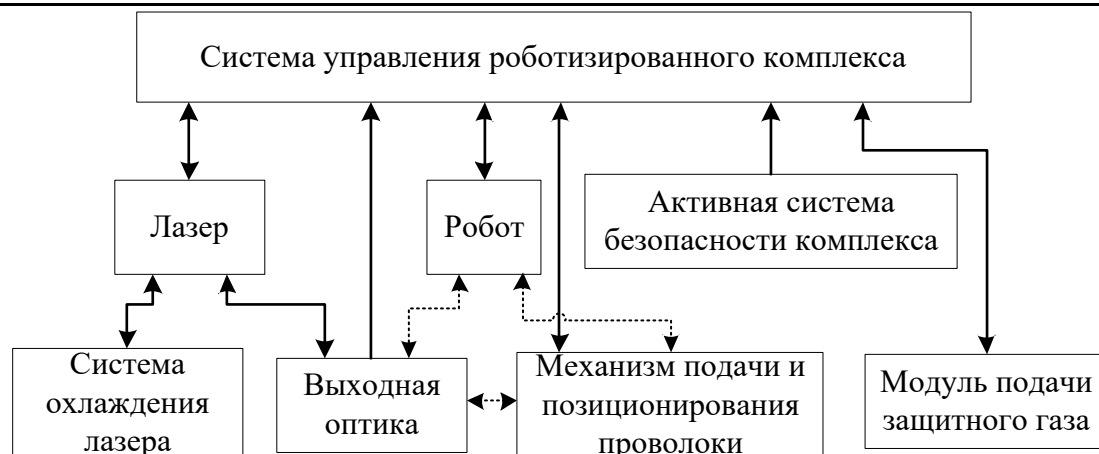


Рис. 1. Функциональная схема роботизированного комплекса трёхмерной печати металлами

Система управления роботизированного комплекса осуществляет чтение управляющей программы печати конкретного изделия, распознаёт типы команд в программе и формирует управляющие воздействия для подчинённых исполнительных устройств. При формировании управляющих воздействий учитываются сигналы обратных связей, поступающие от датчиков, а также сигналы от системы безопасности комплекса и поступающие команды от оператора.

Робот (манипулятор) осуществляет перемещение по заданным координатам печатающей оснастки, состоящей из выходной оптики лазера и механизма подачи и позиционирования проволоки в зоне печати. Механизм подачи и позиционирования проволоки обеспечивает требуемое расстояние и угол наклона проволоки относительно лазерного луча, а также подачу необходимого количества проволоки под лазерный луч с заданными скоростью и ускорением. Выходная оптика лазера служит для фокусировки лазерного луча, поступающего от лазерного источника, в определённой точке.

Лазер генерирует лазерное излучение заданной мощности, передаваемое по гибкому оптоволокну к выходной оптике. Система охлаждения лазера является неотъемлемой частью полноценного комплекта лазерного оборудования и предназначена для поддержания постоянной температуры внутренних элементов лазерного источника и выходной оптики.

Модуль подачи защитного газа управляет потоком инертного газа, подаваемого в зону печати локально в место пересечения лазерного луча с проволокой.

Активная система безопасности отслеживает возникновение аварийных ситуаций в процессе работы комплекса, в том числе определяет факт попадания прямого луча в защитное ограждение, а также принимает меры по сокращению ущерба от возникших ситуаций путём остановки работы оборудования.

Всё перечисленное оборудование комплекса может быть разделено на две категории: готовые серийно изготавливаемые устройства (робот, лазер, система охлаждения лазера, выходная оптика) и устройства, разрабатываемые и проектируемые при построении комплекса (механизм подачи и позиционирования проволоки, активная система безопасности комплекса, модуль подачи защитного газа и система управления комплекса).

Для дальнейшей разработки роботизированного комплекса необходимо детализировать внутреннюю структуру системы управления роботизированного комплекса. Так как система управления роботизированного комплекса будет состоять из нескольких отдельных устройств, связанных между собой, то при детализации необходимо рассмотреть и проанализировать возможные варианты структуры данной системы управления.

Разработка вариантов структуры системы управления роботизированного комплекса. Разрабатываемая система управления должна реализовывать следующие функции:

- взаимодействие с человеком-оператором;

- хранение файла управляющей программы печати изделия, построчное чтение этого файла, распознавание типов команд программы;
- формирование необходимых сигналов задания для перемещения в пространстве робота-манипулятора с дальнейшим расчётом и формированием необходимого питания для приводов робота;
- формирование сигналов задания режимов работы лазера;
- формирование сигналов задания позиции проволоки относительно лазерного луча с дальнейшим формированием необходимого питания приводов механизма позиционирования;
- формирование сигналов задания параметров подачи проволоки (скорости, ускорения и количества) с дальнейшим расчётом и формированием необходимого питания для привода подачи;
- формирование сигналов задания для подачи защитного газа;
- приём и обработка сигналов обратной связи от датчиков (давление защитного газа, фактическая скорость подачи проволоки, состояние выходной оптики лазера, расположение объектов в зоне печати);
- реализация функций безопасности (отслеживание нажатия кнопок аварийного останова, отслеживание выхода лазерного луча за пределы зоны печати, отслеживание открывания ворот защитного ограждения, отслеживание внутренних ошибок оборудования, остановка оборудования комплекса).

Так как структура комплекса включает значительное количество сложных в управлении устройств, то в неё также будет входить набор отдельных элементов, специализированных на решении локальных задач управления. При этом важным вопросом при разработке такой системы управления будет вопрос определения необходимой иерархии устройств в составе системы и распределение вышеописанных функций между устройствами.

Так как управляющая программа печати конкретного изделия представляет собой один файл (в случае разделения программы на несколько файлов задача подготовки печати значительно усложнялась бы), то иерархия устройств, реализующих функции управления, должна содержать минимум два уровня. На верхнем уровне должны находиться некоторый центральный контроллер, осуществляющий хранение, чтение и анализ управляющей программы, а также интерфейс для взаимодействия с оператором. На нижнем уровне должны располагаться все остальные устройства, входящие в состав системы управления.

В соответствии с этим положением и вышеописанными функциями было разработано два варианта структуры системы управления роботизированного комплекса трёхмерной печати, приведённые в виде функциональных схем на рис. 2 и 3.

Представленные на рис. 2 и 3 структуры отличаются распределением устройств по иерархии структуры систем управления. В первом случае верхний уровень системы управления реализован в виде контроллера робота, во втором – в виде отдельного программируемого логического контроллера (ПЛК). На обеих схемах в рамке показаны элементы системы управления комплекса. Исполнительные устройства, ранее приведённые на рис. 1, на рис. 2 и 3 не отражены, а только лишь показаны направления передачи информации в виде подписей на концах стрелок.

Возможность применения контроллера робота в качестве главного устройства (см. рис. 2) связана с тем, что современные контроллеры промышленных роботов позволяют реализовывать подключение внешних устройств посредством различных интерфейсов с дальнейшей разработкой пользовательских алгоритмов с достаточно широким функционалом и сложностью [17; 18]. При таком подходе контроллер робота выполняет хранение файла управляющей программы, чтение и распознавание команд из файла, реализует полный цикл управления перемещением робота, формирует сигналы задания для контроллеров управления отдельными устройствами, получает и обрабатывает сигналы от датчиков, обрабатывает сигналы от контроллера распознавания видео, реализует алгоритмы реагирования на поступление сигналов от системы безопасности комплекса. При такой структуре системы управления в качестве интерфейса оператора можно использовать штатный пульт управления роботом, однако следует помнить, что большинство пультов управления роботами не предполагает разработку отдельного пользовательского интерфейса и позволяет использовать только встроенные функции.

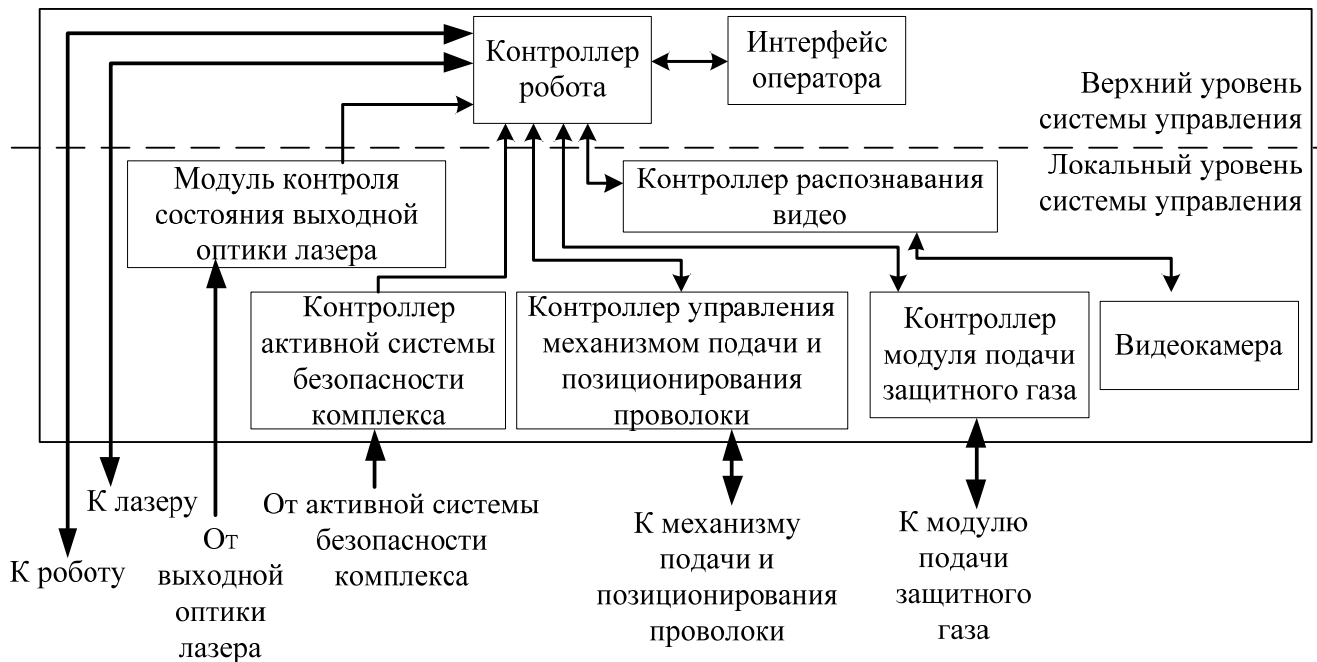


Рис. 2. Функциональная схема системы управления с главным устройством в виде контроллера робота

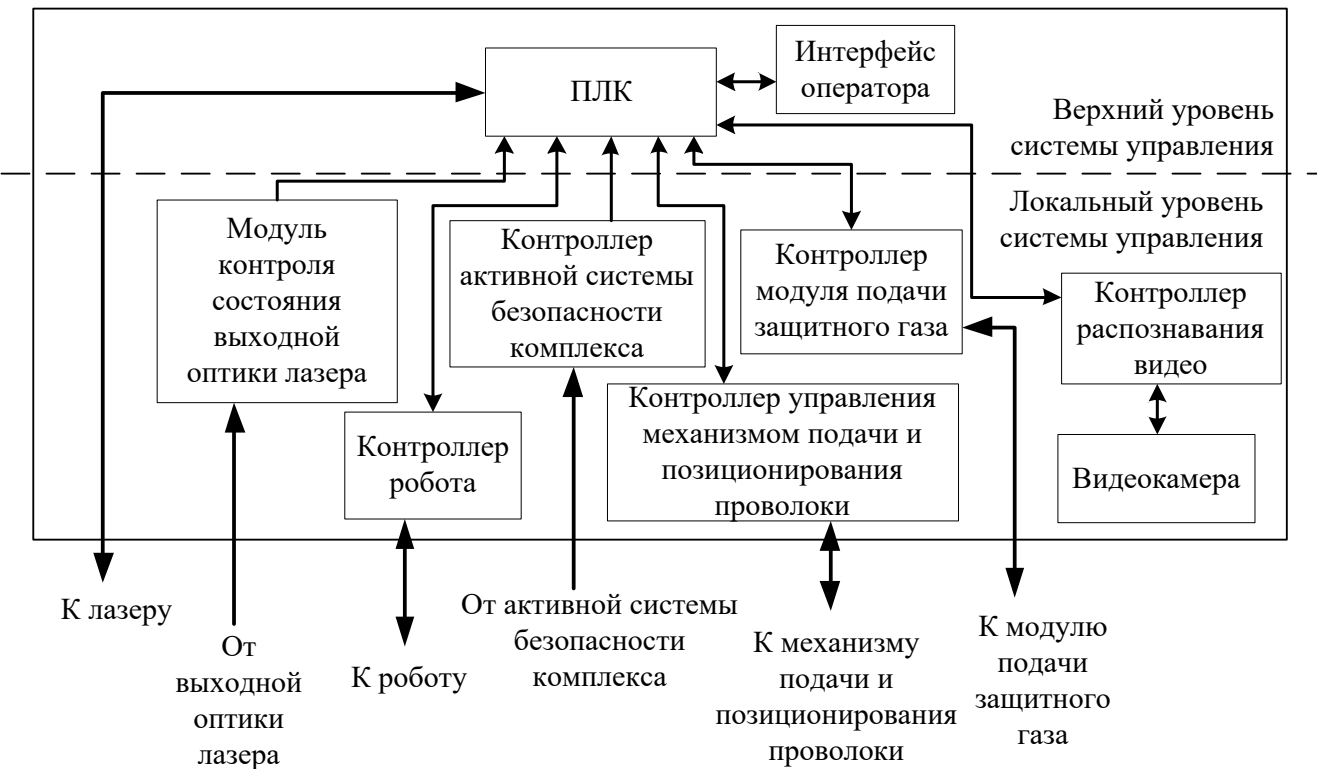


Рис. 3. Функциональная схема системы управления с главным устройством в виде отдельного ПЛК

Во втором варианте структуры контроллер робота осуществляет только полный цикл управления перемещениями робота. При этом координаты и траектории перемещения контроллер робота получает от вышестоящего ПЛК. ПЛК в свою очередь осуществляет хранение файла управляющей программы, чтение и распознавание команд из файла, формирование сигналов задания для лазера и контроллеров управления механизмом подачи и позиционирования проволоки, а также модуля подачи защитного газа, осуществляет приём и обработку сигналов обратных связей от робота, лазера, модуля контроля состояния выходной оптики лазера, контроллеров активной системы безопасности комплекса, механизма подачи и позиционирования проволоки, модуля подачи защитного газа и контроллера распознавания видео.

Все остальные устройства в обоих вариантах реализации структуры имеют следующий функционал:

- Модуль контроля состояния выходной оптики лазера принимает сигналы от датчиков, встроенных в выходную оптику, и в зависимости от уровня этих сигналов формирует сигналы предупреждения или тревоги для главного устройства.

- Контроллер активной системы безопасности получает сигналы от датчиков, встроенных в ограждение комплекса, сравнивает их уровни с допустимыми и формирует сигналы тревоги с номером датчика для главного устройства в случае выхода сигналов за допустимые пределы.

- Контроллер управления механизмом подачи и позиционирования проволоки получает от главного устройства сигналы задания положения проволоки и параметров подачи проволоки. На основании полученных сигналов задания контроллер рассчитывает и формирует управляющие сигналы для драйверов входящих в состав механизма двигателей.

- Контроллер модуля подачи защитного газа получает от главного устройства сигналы задания для подачи защитного газа, в соответствии с которыми формирует необходимое силовое питание для открытия или закрытия клапанов подачи газа. Также контроллер получает сигналы от датчика давления газа и в случае падения давления ниже определённых величин передаёт на главное устройство сначала сигналы предупреждения, а затем (при падении давления ниже критического уровня) тревоги.

- Видеокамера располагается на печатающей оснастке и применяется для контроля качества печати и оценки правильности протекания технологического процесса. Контроллер распознавания видео осуществляет анализ изображения с камеры и распознавание проволоки, точки расплавления проволоки лучом и уже нанесённых фрагментов материала и определяет возникшие отклонения их взаимного расположения. Результаты распознавания в виде необходимых коррекций расположения печатающей оснастки передаются на главное устройство в системе управления.

Анализ разработанных вариантов структуры системы управления. Проведём анализ преимуществ и недостатков разработанных вариантов структуры.

Преимуществом первого варианта является упрощение состава и удешевление оборудования комплекса, т. к. при этом варианте не требуется дополнительного оборудования в виде ПЛК.

Недостатками же данной структуры являются:

- необходимость в разработке специализированных программных пакетов для взаимодействия контроллера робота с лазерным оборудованием, интерфейсом оператора и для организации связи с элементами комплекса, что затруднено для большинства серийно производимых роботов. Это связано с высокой степенью закрытости системного ПО промышленных роботов;

- специфическая подготовка управляющей программы для печати изделия, выражающаяся в такой компоновке программы, чтобы контроллер робота мог распознавать различные типы команд и обеспечивать синхронизацию управляющих воздействий для остального оборудования;

- ограниченный объём файла управляющей программы печати конкретного изделия, заведомо недостаточный для большинства печатаемых изделий. Это связано с ограничениями на длину программы в контроллере робота;

- сложность обеспечения быстродействия системы и высоких скоростей обмена информацией с внешними устройствами, т. к. вся вычислительная нагрузка возлагается на одно устройство, а команды в управляющей программе выполняются строго последовательно;

- контроллер робота фактически реализует как функции верхнего уровня системы управления, так и функции локальной системы управления механикой робота-манипулятора. Это приводит к частичному размытию границ между уровнями иерархии системы и возникновению потенциальных конфликтов между функционалом разных уровней в одном устройстве.

При этом для второго варианта структуры характерны следующие преимущества:

- наличие отдельного управляющего устройства в виде ПЛК, на котором нет необходимости осуществлять сложные вычисления траекторий перемещения промышленного манипулятора, что сильно поднимает быстродействие комплекса и позволяет обеспечить высокие скорости обмена управляющей информацией;

- отсутствие необходимости в разработке специализированных программных пакетов для контроллера робота (взаимодействие с интерфейсом оператора реализуется штатными программными средствами ПЛК, управление лазером и организация связи с элементами комплекса реализуются подачей необходимых дискретных и аналоговых сигналов напрямую с ПЛК либо по промышленным сетям);

- передача команд перемещения контролеру реализуется с применением штатных средств ПЛК и контроллера робота (либо с применением готовых программных пакетов и библиотек);

- хранение управляющей программы может быть организовано на внешнем накопителе, что снимает ограничение на размер управляющей программы.

К недостаткам второго варианта структуры можно отнести усложнение структуры комплекса за счёт добавления дополнительного элемента (ПЛК) и повышение итоговой стоимости оборудования комплекса.

На основании проведённого анализа для дальнейшей реализации был выбран вариант структуры системы управления комплекса с главным устройством в виде отдельного ПЛК.

Заключение. В рамках представленной работы решался вопрос разработки структуры системы управления роботизированного комплекса трёхмерной печати металлами. В результате были получены следующие результаты:

- на основе анализа структуры оборудования комплекса сформированы функциональные требования к системе управления комплекса;

- разработано два варианта структур системы управления, отличающиеся распределением функций между элементами системы управления;

- на основе анализа предложенных вариантов структуры системы управления сделан вывод, что, несмотря на повышение сложности системы управления и её стоимости, вариант структуры с главным устройством в виде отдельного ПЛК является предпочтительным для дальнейшей реализации.

Результаты работы будут использованы в дальнейшем при проектировании системы управления роботизированного комплекса и разработке алгоритмов работы элементов данной системы управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Диесперова, Н. А. Применение цифровых и аддитивных технологий в задачах новой индустриализации РФ / Н. А. Диесперова, К. В. Диесперов // Горизонты экономики. – 2022. – № 6 (72). – С. 25-33.
2. Смирнов, В. В. Внедрение аддитивных технологий изготовления деталей в серийное производство / В. В. Смирнов, Е. Ф. Шайхутдинова // Вестник Казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева. – 2013. – № 2-2. – С. 90-94.
3. Армашова-Тельник, Г. С. Аддитивные технологии: новационный эффект в промышленности / Г. С. Армашова-Тельник, П. Н. Соколова, Д. В. Дегтерев // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2020. – Т. 82. – № 4 (86). – С. 347-353.
4. Лебединский, К. В. Порошковые материалы в развитии аддитивных технологий в автомобилестроении / К. В. Лебединский, А. А. Николотов, Д. П. Алексеев // Сурский вестник. – 2019. – № 1 (5). – С. 17-20.
5. Электронно-лучевая сварка // ОАО «НИТИ «Прогресс» 2022. – URL: https://www.niti-progress.ru/files/catalog_elu_svarka_2022.pdf (дата обращения: 12.10.2023). – Текст: электронный.

6. Разработка архитектуры системы управления роботизированным производственным процессом на базе технологии цифрового двойника / М. А. Горькавый [и др.] // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2023. – № I (65). – С. 40-46.
7. Преимущества использования SLM-печати в ракетостроении / Т. А. Федченко, Н. А. Данилов, Я. А. Халеев, М. И. Толстопятов // Chronos. – 2022. – Т. 7. – № 6 (68). – С. 11-12.
8. Применение аддитивной технологии селективного лазерного сплавления в конструкции малоэмиссионной камеры сгорания газотурбинной установки / Ю. С. Елисеев [и др.] // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2019. – Т. 18. – № 1. – С. 174-183.
9. Гребенщикова, Т. Д. Применение аддитивных технологий при изготовлении турбинных лопаток из сплавов на основе никеля / Т. Д. Гребенщикова, В. В. Рыжков // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации. – 2020. – Т. 1. – С. 56-59.
10. Сятчихин, А. А. Оценка возможности применения аддитивных технологий при производстве изделий ракетно-космической техники / А. А. Сятчихин, А. И. Смирнов // Вестник образования и развития науки Российской академии естественных наук. – 2022. – № 1. – С. 41-44.
11. Прямое изготовление металлических деталей с применением LOM-технологии / Н. К. Толочко, А. А. Андрушевич, П. С. Чугаев, Т. А. Богданович // Литьё и металлургия. – 2018. – № 1 (90). – С. 137-143.
12. Chiu, Y.Y. Automatic fabrication for bridged laminated object manufacturing (LOM) process / Chiu Y. Y., Liao Y. S., Hou C. C. // Journal of Materials Processing Technology. Vol. 140. Issues 1–3. 2003. pp. 179-184. doi: 10.1016/S0924-0136(03)00710-6.
13. Svetlizky, D. Directed energy deposition (DED) additive manufacturing: Physical characteristics, defects, challenges and applications / Svetlizky D., Das M., Zheng B., Vyatskikh A. L., Bose S., Bandyopadhyay A., Schoenung J. M., Lavernia E. J., Eliaz N. // Materials Today. Vol. 49. 2021. pp. 271-295. doi: 10.1016/j.mattod.2021.03.020.
14. Czink, S. Process development for the hybrid additive manufacturing of metallic structures on polymer substrates / Czink S., Lubkowitz V., Dietrich S., Schulze V. // Additive Manufacturing Letters. 2023. 100132. doi: 10.1016/j.addlet.2023.100132.
15. Ghorbani, H. R. Hybrid additive manufacturing of an electron beam powder bed fused Ti6Al4V by transient liquid phase bonding / Ghorbani H. R., Mosallanejad M. H., Atapour M., Galati M., Saboori A. // Journal of Materials Research and Technology. Volume 20. 2022. pp. 180-194. doi: 10.1016/j.jmrt.2022.07.009.
16. Korkmaz, M. E. A technical overview of metallic parts in hybrid additive manufacturing industry / Korkmaz M. E., Waqar S., Garcia-Collado A., Gupta M. K., Krolczyk G. M. // Journal of Materials Research and Technology. Vol. 18. 2022. pp. 384-395. doi: 10.1016/j.jmrt.2022.02.085.
17. KUKA System Software 8.3: инструкция по эксплуатации и программированию для конечного пользователя / KUKA Roboter GmbH. – 2016. – 279 с.
18. KUKA System Software 8.3: Operating and Programming Instructions for System Integrators / KUKA Roboter GmbH. – 2014. – 487 p.