Автоматизация процесса получения порошка методом PREP на базе программируемых контроллеров семейства DL-205

Среди различных методов получения порошков в России наиболее широкое распространение получил метод вращающейся заготовки с плазменным нагревом (Plasma Rotating Electrode Process, PREP), схема которого приведена на рис. 1 (n – частота вращения заготовки, v_0 – начальная скорость слёта частицы с венца, v_k – скорость кристаллизации частицы). Вращающаяся заготовка подается в камеру распыления, где в результате оплавления плазменной дугой на торце заготовки образуется жидкая пленка металла толщиной в несколько раз меньше диаметра образующегося порошка. Отделение частицы от заготовки происходит с торцевого жидкого венца, диаметр которого больше диаметра заготовки. Частицы расплава, оторвавшиеся от венца вращающейся заготовки, перемещаясь в газовой среде, образуют после кристаллизации порошок шарообразной формы.

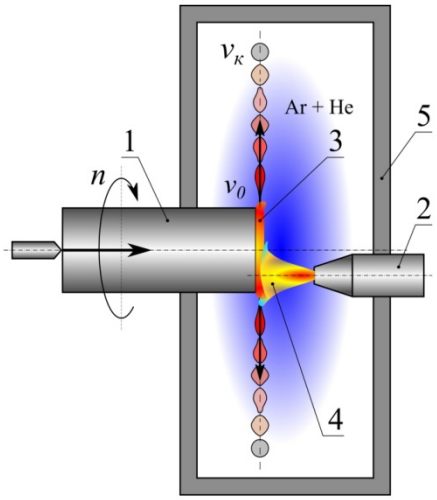

Рис. 1. Схема центробежного распыления быстровращающейся заготовки плазменной струёй: 1 – заготовка, 2 – плазмотрон, 3 – плёнка жидкого металла, 4 – плазменная струя, 5 – камера распыления

На первой стадии формирования частицы до момента её отделения от венца практически отсутствует взаимодействие частицы с газовой средой. Следовательно, исключается появление частиц с газовыми и прочими включениями. Охлаждение и кристаллизация в смеси инертных газов происходят на второй стадии. При скорости кристаллизации выше 10^3–10^4 °C/c образуются частицы с мелкозернистой структурой. С увеличением скорости охлаждения повышается дисперсность микроструктуры порошковой частицы, что связано с изменением в условиях роста кристаллов. Гранулометрический состав получаемого порошка можно регулировать изменением частоты вращения заготовки.

История управления технологическими процессами получения порошка методом PREP во многом традиционна. В первых специализированных установках использовались электромеханические регуляторы для стабилизации отдельных параметров процесса, так как аппаратные средства автоматики не позволяли организовать более сложные системы.

Разработка новых подходов к управлению технологическим процессом получения порошка методом PREP и на сегодняшний день остаётся актуальной задачей. Это обусловлено как необходимостью совершенствования технологии и повышения качества порошка, так и развитием современных систем управления построенных, как правило, на базе программируемых логических контроллеров, промышленных компьютеров,

однокристальных микроЭВМ и устройств видеонаблюдения, объединённых в цифровую локальную сеть.

Автоматизация процесса PREP, который охватывает большой комплекс физических и химических процессов, на базе компьютерной технологии открывает новые возможности. Появилась возможность создания целостных технологических систем обработки данных технологического процесса, базирующихся на принципах комплексной автоматизации основных и вспомогательных технологических операций, удобном интерфейсе, обеспечивающем лёгкий доступ оператора к информационным и вычислительным ресурсам.

Процесс получения порошка как объект управления

Как объект управления установка для получения порошка представляет собой сложную технологическую систему (Т-систему), под которой, понимается совокупность функционально взаимосвязанных средств технологического оснащения, предметов производства и исполнителей, предназначенная для выполнения в регламентированных условиях производства заданных технологических процессов и операций в соответствии с требованиями нормативно-технической документации. К характерным особенностям Т-системы относятся: составной характер системы; разнородность подсистем и элементов, составляющих систему; многокритериальность оценок процессов, протекающих в системе; семиотическая природа информационных связей между подсистемами и элементами.

При проектировании Т-системы к числу наиболее наукоемких проблем относится построение системы управления (СУ), представляющей собой особый класс динамических систем, отличающихся наличием самостоятельных функций и целей управления, высоким уровнем системной организации. В общем случае, СУ представляет собой некоторое множество взаимосвязанных и взаимодействующих подсистем управления, выполняющих самостоятельные и общесистемные функции управления.

В СУ можно выделить следующие компоненты: активную, чувствительную, изолирующую, управляющую, программно-математическую и каналы связи. Активная компонента осуществляет определение положения рабочих механизмов перемещения заготовки и плазматрона. Чувствительная компонента обеспечивает контроль параметров процесса получения порошка. Изолирующая компонента обеспечивает нормальную работу СУ, компенсируя или ослабляя внешние помехи. Каналы связи предназначены для передачи координирующих, управляющих и корректирующих сигналов, обеспечивая взаимодействие компонент системы.

Иерархическая структура системы управления процессом производства порошка методом PREP показана на рис. 2.

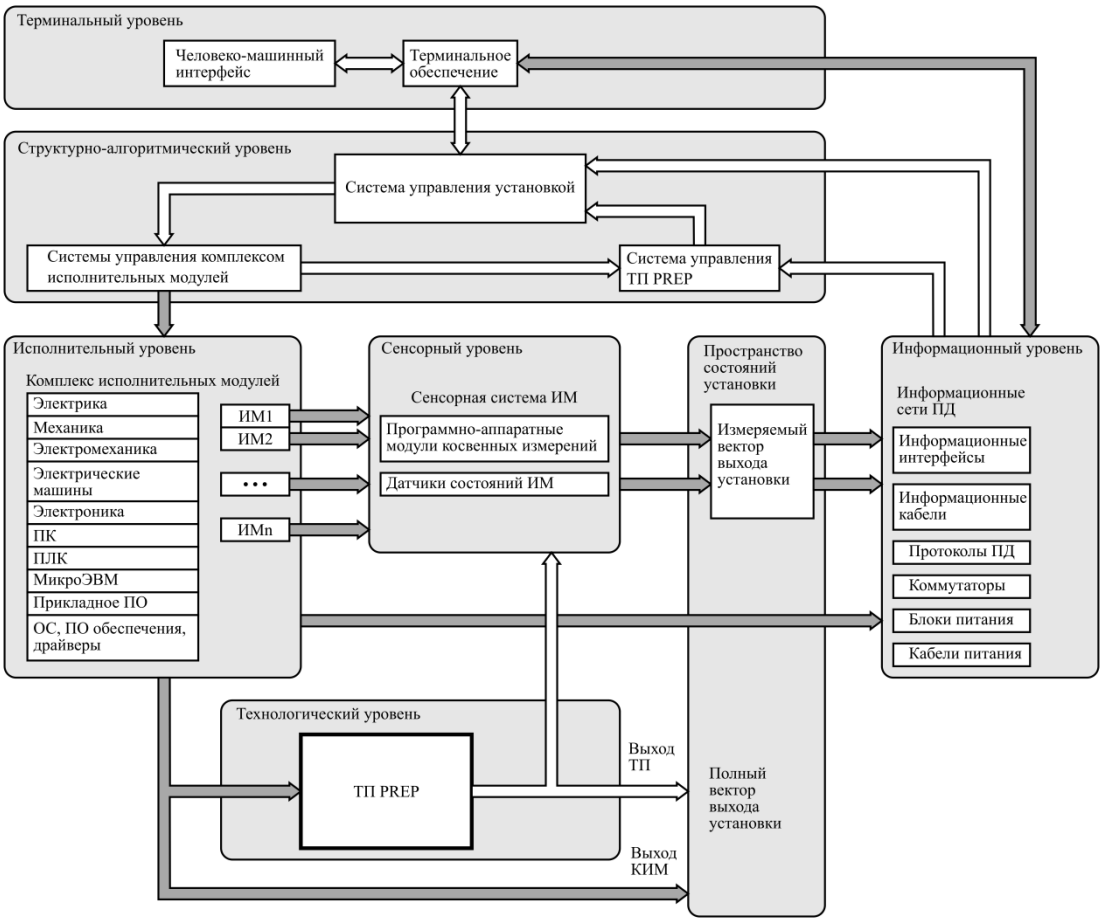

Рис. 2: Иерархическая структура системы управления процессом производства порошка методом PREP

Синтез регуляторов параметров процесса

Основной задачей управления процессом получения порошка прогнозируемого размера в соответствии с нормальным распределением является стабилизация необходимого теплового баланса в области распыления, поддержание которого, как правило, выполняется по измерению косвенных параметров: зазор между заготовкой и плазмотроном, эксцентриситет плазменной струи, ток дуги. Стабильное поддержание перечисленных параметров обеспечивает постоянную толщину жидкой плёнки на торце заготовки, что создаёт благоприятные условия для формирования порошка заданного размера и структуры.

Регулируемые и выходные параметры процесса методом PREP, их назначение, обозначения и взаимное влияние приведены в табл. 1.

Таблица 1.

Влияние регулируемых параметров процесса на выходные параметры

Номер	Регулируемые входные переменные	Обозначение	Регулирование	Стабилизация	Контролируемые выходные переменные
1.	Частота вращения заготовки	n	+	+	Гранулометрический состав частиц $d_ч$
2.	Скорость продольной подачи заготовки	V_e	+	□	Зазор □между заготовкой и плазмотроном
3.	Скорость продольной подачи плазмотрона	V_p	+	□	
4.	Ток дуги	I	+	+	Скорость кристаллизации частиц V_k Поддержание заданной геометрии торца заготовки G_T
5.	Рабочее давление в камере распыления	P	+	+	
6.	Эксцентриситет плазмотрона по оси Y	$\square_y$	+	+	
7.	Эксцентриситет плазмотрона по оси Z	$\square_z$	+	+	

Важнейший показатель процесса – массовый расход заготовки. Допустим, что в процессе распыления заготовка сохраняет цилиндрическую форму. Тогда массовый расход материала заготовки в течение вычислительного цикла равен:

$$m = \int_{t_1}^{t_2} \rho S V_e(t) dt$$

где m – массовый расход материала заготовки, ρ – плотность материала заготовки, t_1 и t_2 – значение времени в начальный и конечный момент измерения, V_e – скорость продольного перемещения заготовки, S – площадь поперечного сечения заготовки, t – время.

Площадь сечения заготовки:

$$S = \pi r^2 = \frac{\pi d^2}{4},$$

где r и d – радиус и диаметр заготовки, соответственно.

При устойчивом тепловом балансе в области распыления выполняется следующее

$$V_i = V_{pr},$$

где V_i – текущая скорость продольного перемещения заготовки, V_{pr} – программная скорость перемещения заготовки.

Превышение значения текущего массового расхода распыляемой заготовки m в течение некоторого регламентированного периода времени свидетельствует о нарушении теплового баланса в области распыления и необходимости принятия мер по восстановлению процесса.

Например, нарушение формы заготовки сопровождается возрастающими механическими биениями, энергия которых суммируется с кинетической энергией механического комплекса. В результате расплавленный торец заготовки «стекает» и застывает в виде наплывов.

Начало момента возникновения внештатной ситуации можно зафиксировать датчиком вибраций, который устанавливается на прижимном ролике. Оценка прогнозируемого номинального массового расхода распыляемой заготовки должна непрерывно сравниваться с его значением, полученным с учетом текущей скорости.

Наиболее эффективным средством защиты от аварийного режима распыления заготовки является обеспечение ограничения скоростей продольной подачи заготовки и плазмотрона:

$$V_i(t) \le V_{\max},$$

где $V_i(t)$ – текущая скорость, $V_{\max}$ – допустимая максимальная скорость.

Для организации процесса получения порошка методом PREP необходимо выполнить синтез УП и регуляторов следующих контуров стабилизации (рис. 3): I – ток плазменной дуги, n – частота вращения заготовки, P – давление в рабочей камере, Δ – зазор между заготовкой и плазмотроном, геометрическая форма торца заготовки (в качестве геометрические характеристики торца распыляемой заготовки).

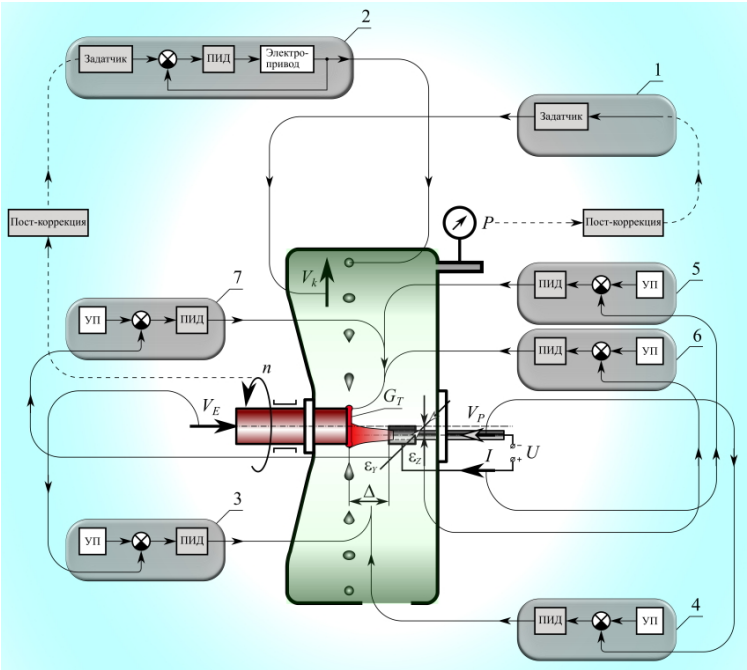

Рис. 3. Контуры регулирования параметров процесса получения порошка методом PREP (УП – управляющая программа, ПИД – пропорционально–интегрально–дифференцирующий регулятор, ОУ – объект управления, 1 – контур регулирования давления, 2 – контур управления частотой вращения заготовки, 3 и 4 – контуры стабилизации зазора, 5 – контур стабилизации плазменной дуги, 6 и 7 – контуры позиционирования плазмотрона по осям Y и Z)

В каждом вычислительном цикле происходит считывание показаний от датчиков обратной связи. Задачей СУ является поддержание стабильности ТП. Условием успешного решения этих задач является математическое моделирование ТП, которое позволяет рассчитать основные параметры УП процесса, выбрать оптимальные коэффициенты для контуров регулирования.

Управляющее воздействие по ПИД–закону регулирования имеет следующий вид:

$$u(t_k) = u_0 + K_c\left\{[y_d - y(t_k)] + \frac{\Delta t}{\tau_I}\sum_{n=1}^{k}[y_d - y(t_n)] + \frac{\tau_D}{\Delta t}[y(t_k) - y(t_{k-1})]\right\},$$

где $u(t_k)$ – величина управляющего сигнала в момент времени $t = t_k$; u_0 – постоянная составляющая сигнала управления; K_c – коэффициент усиления пропорциональной части; τ_I – постоянная времени интегратора; τ_D – постоянная времени дифференциатора; $y(t_k)$ – текущее значение параметра; y_D – уставка; Δt – время вычислительного цикла (интервал дискретизации).

Гранулометрический состав порошка в общем случае зависит не только от частоты вращения заготовки и коэффициента поверхностного натяжения распыляемого материала,

но и от тока дуги, зазора между заготовкой и плазмотроном, эксцентриситета плазмотрона и других параметров:

$$d = f(n, I, \Delta, e_y, e_z, \ldots).$$

Прогнозирование размера порошка ориентировочно выполняется по аналитической формуле

$$d_p = 23.39\left(\frac{\sigma\eta}{\rho_p R_e}\right)^{1/2} / n,$$

которая отражает доминирующую зависимость диаметра частиц от частоты вращения заготовки. Однако, при проведении ряда процессов распыления на различных материалах и частотах вращения заготовки, было отмечено, что её использование даёт нарастающую погрешность, так как не учитывает влияние мощности плазменной дуги, геометрической формы струи, величины зазора, эксцентриситета. Поэтому можно предложить следующую уточняющую зависимость для прогнозирования диаметра получающихся частиц:

$$d = \prod_{i=1}^{n} a_i L^{b_i},$$

где L – параметр, влияющий на диаметр частицы (n, I, Δ, e_y, e_z, …), a_i и b_i –коэффициенты, которые определяются в результате статистического анализа фракционного состава порошка.

Важнейший параметр процесса, скорость кристаллизации частицы, во многом определяющий структуру частицы, зависит от давления инертной среды в камере распыления, размеров частицы и скорости ее отрыва от венца заготовки, химического состава инертной среды.

$$V_k = f(P, X, d, V_0, \ldots),$$

где V_k – скорость кристаллизации, P – давление в камере распыления, X – химический состав инертной среды, d – диаметр частицы, V_0 – начальная скорость частицы в момент отрыва от венца.

Структура системы управления

Структуру СУ можно определить как совокупность функциональных элементов и внутренних связей между ними. По структуре связей между элементами различают системы с последовательными, параллельными, обратными, кольцевыми, веерными связями и иерархической структурой.

Структура современных МСУ специализированных установок для получения порошка является иерархической: каждая подсистема входит как составная часть в систему более высокого уровня. Иерархическое построение СУ обеспечивает её повышенную устойчивость к внешним воздействиям, способствует локализации конфликтов, возникающими между отдельными элементами системы производства порошка, согласует отдельные цели элементов и подсистем с общими целями всей системы.

Иерархическая структура СУ позволяет также значительно сократить количество электрических разводок, минимизировать электромагнитные помехи на измерительные цепи. Особенностью, представленной на рис. 4, структуры является возможность управления по неполным измерениям вектора состояния и, как следствие, в условиях неопределенности.

Возможности МСУ во многом определяется, с одной стороны, наличием ММ процесса получения порошка, алгоритмов оптимизации процесса, адаптивного управления, с другой стороны, аппаратными и программными возможностями самой СУ. Вычислительный потенциал современной мультипроцессорной СУ обеспечивает возможность интеграции функций проектирования технологии в машинном масштабе времени и управление процессом обработки детали в реальном масштабе времени.

К основным свойствам и особенностям МСУ можно отнести:

– наличие ММ процесса получения порошка на базе оригинальных или универсальных конечно–элементных пакетов для решения теплофизических задач и гидродинамики;
– реализацию алгоритмов адаптивного управления от датчиков состояния, обеспечивающих обратную связь, для корректировки УП в реальном масштабе времени.
– поддержание развитого САМ интерфейса (САМ – система технологической подготовки и управления);
– наличие многооконного интерфейса пользователя с цветной объемной графикой;
– размещение в системе резидентных средств автоматизированной или автоматической разработки УП;
– согласование работы системы с другими управляющими устройствами через канал передачи данных по стандартному протоколу;
– использование большого набора стандартных программных средств;
– хранение на диске архива файлов УП, корректоров и параметров;
– организация модулей технического диагностирования и прогнозирования состояния элементов АСПП.

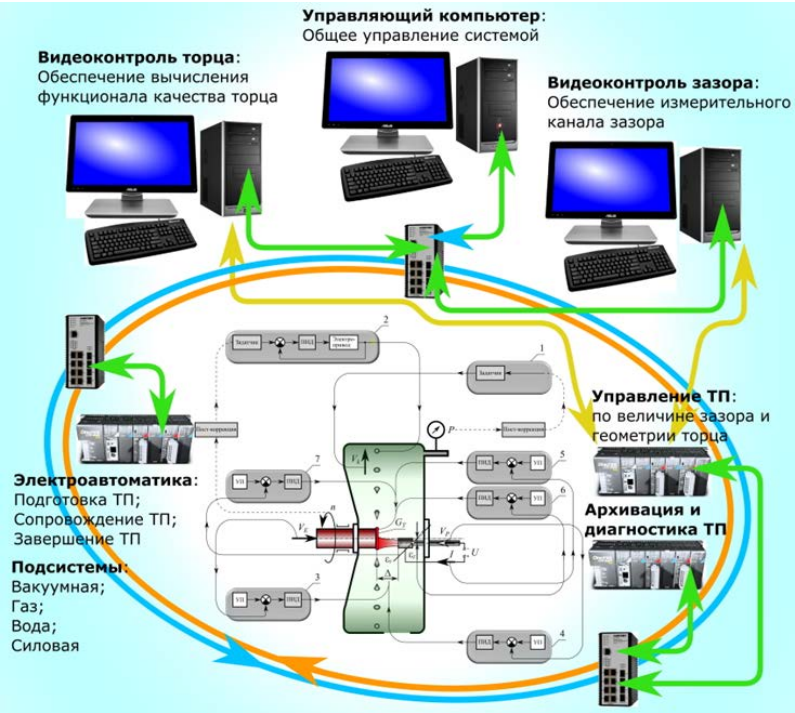

Рис. 4. Структурная схема мультипроцессорной системы управления установки получения порошка (1 – ПК контроля геометрии торца, 2 – центральный ПК, 3 – ПК контроля зазора, 4, 5 и 6 – коммутаторы, 7 – видеокамера измерения зазора, 8 – видеокамера измерения геометрии торца, 9 – ПЛК дискретной автоматики, 10 – ПЛК механизмов и энергокомплекса, 11– ПЛК документирования и диагностики параметров, 12 – заготовка, 13 – плазмотрон, 14 – жидкая плёнка, 15 – плазменная струя, 16 –датчик вибраций, 17 – двойное кольцо сетевой топологии)

Одновременное регулирование технологических параметров соответствует многосвязной ММ процесса получения порошка методом PREP. При использовании видеокамеры в качестве измерителя геометрических параметров торца заготовки, зазора между заготовкой и плазмотроном возможна организация дополнительного контура обратной связи, позволяющего контролировать состояние теплового баланса в области распыления.

Общее управление (первый уровень) осуществляет центральная электронно–вычислительная машина (ЭВМ), которая по промышленной сети Ethernet передаёт команды на промежуточные ЭВМ второго уровня. Микропроцессорные устройства

источника питания плазмотрона, сервоустройств, электрических приводов составляют третий уровень управления.

СУ с обменом информацией по локальной вычислительной сети, представленная на рис. 4 (ЗП – задатчик положения, ПИД – пропорциональный интегральный дифференциальный регулятор, ε_y – эксцентриситет плазмотрона по оси Y, ε_z – эксцентриситет плазмотрона по оси Z), включает:

– устройства локальной автоматики: регуляторы параметров источника питания плазменной дуги, сервоприводы двигателей, усилители постоянного и переменного тока, средства программируемых микропроцессорных управляющих устройств;

– устройства связи с объектом: модули цифроаналогового и аналого–цифрового преобразования, адаптеры различных устройств, модемы, модули преобразования интерфейсов;

– устройства связи с оператором: видеокамеры, тепловизоры, пирометры, панели управления вакуумных станций, панель ручного управления параметрами источника плазмы, индикаторы, сигнализаторы аварийных и внештатных ситуаций;

– датчики сигналов физических величин: ток плазмы, скорости и текущего положения по координатам механических перемещений (X_1, X_2, Y, Z, A); давление в вакуумных насосах, температура охлаждающей воды и прочее.

При сетевой архитектуре СУ важнейшей задачей является организация надёжного обмена информацией между вычислительными устройствами, т.е. вопросы резервирования и отказоустойчивости всей инфраструктуры промышленной цифровой сети.

Для обеспечения защиты каналов связи от единичного отказа необходимо их резервировать. Резервирование неизбежно ведет к возникновению кольцевых участков сети — замкнутых маршрутов. Стандарт Ethernet предусматривает только древовидную топологию и не допускает кольцевых, так как это приводит к зацикливанию пакетов. Вся сложность заключается в том, что данный стандарт не имеет понятия TTL (Time to live) – время жизни пакета данных в протоколе IP (предельно допустимое время его пребывания в системе), который работает уже на сетевом уровне.

Для организации кольцевой топологии промышленной сети Ethernet был разработан протокол MRP. Media Redundancy Protocol (MRP) – это протокол физического уровня, утвержденный стандартом IEC 62439–2. Он позволяет строить кольцевые топологии, избегая единичные отказы в работе сети, путем обеспечения времени схождения кольца намного быстрее; создавать топологию двойного кольца, включающую основную и резервную линию передачи данных, которая обеспечивает работоспособность сети даже в случае повреждения основной линии связи. Современные модули удалённого ввода–вывода должны иметь не менее двух портов.

Для организации связи в СУ, имеющей несколько колец, необходимо использовать промышленные управляемые коммутаторы управления со следующими функциями:

– предупреждение о потере физического соединения; автоматическое восстановление кольца; малое время восстановления, менее 20 мс; защита от зацикливания.

Современные промышленные коммутаторы, как правило, поддерживают дополнительный протокол Spanning Tree Protocol (STP, IEEE 802.1d), который позволяет создавать кольцевые маршруты в сетях Ethernet. Постоянно анализируя конфигурацию сети, STP автоматически выстраивает древовидную топологию, переводя избыточные коммуникационные линии в резерв. В случае нарушения целостности построенной таким образом сети (например, обрыв связи), STP в считанные секунды включает в работу необходимые резервные линии, восстанавливая древовидную структуры сети. Этот протокол не требует первичной настройки и работает автоматически.

Основная задача STP — предотвратить появление петель на втором уровне. Он просто отключает все избыточные связи, пока они не понадобятся. STP использует

алгоритм STA (Spanning Tree Algorithm), результатом работы которого является граф в виде дерева (связный и без простых циклов).

Для обмена информацией между собой сетевые коммутаторы используют специальные пакеты, так называемые BPDU (Bridge Protocol Data Units). BPDU бывают двух видов: конфигурационные (Configuration BPDU) и объявляющие о смене топологии TCN (Topology Change Notification BPDU).

Более мощная разновидность данного протокола — Rapid Spanning Tree Protocol (RSTP, IEEE 802.1w) – позволяет снизить время перестройки сети до нескольких миллисекунд. Протоколы STP и RSTP позволяют создавать произвольное количество избыточных линий связи и являются обязательным функционалом для промышленных коммутаторов, применяемых в резервированных сетях.

СУ обеспечивает работу в нескольких режимах: ручном, автоматизированном, автоматическом. Под режимом управления понимается способ, в соответствии с которым определяется степень участия человека в работе управляющего оборудования.

В зависимости от степени автоматизации различают автоматизированное и автоматическое управление. Автоматизированная СУ – это человеко–машинная система, обеспечивающая автоматизированный сбор, обработку информации о ТП, выдачу управляющих воздействий в контуры регулирования. Автоматическая СУ представляет собой совокупность управляющих устройств и объектов управления, взаимодействующих без участия человека. Применение систем автоматизированного и автоматического управления позволяет добиться существенного повышения качества получаемого порошка, обеспечить высокую воспроизводимость процесса, повысить производительность труда.

Прикладные программы контроллера разработаны средствами языка RLL^{PLUS} на базе стандарта Международной Электрической Комиссии (МЭК) IEC 1131-4 с широким использованием графических средств программного пакета DirectSOFT под MSWindows 8/10.

В качестве управляющей компоненты для решения задач позиционирования исполнительных механизмов, получения инертной среды к камере распыления, управления энергетическим комплексом на базе плазмотрона выбран программируемый логический контроллер семейства DirectLOGIC 205, который представляет собой управляющую машину реального времени, формирующую сигналы на исполнительные механизмы установки с заданной управляющей программой и информацией о состоянии управляемого объекта.

Человеко-машинные системы управления необходимы в условиях неполной автоматизации ТП для обеспечения оперативного вмешательства в контуры управления. Однако, для повышения стабильности ТП необходимо снижение влияния человеческого фактора. Безусловно, отсутствие человеческого фактора оказывает положительное влияние на стабильность технологического процесса получения порошка и, в конечном итоге, повышает качество частиц, создаёт благоприятные условия для получения порошка прогнозируемого размера, уменьшает дисперсию. Поэтому полная автоматизация технологического процесса – важная составляющая для организации серийного и массового производства порошка с прогнозируемым качеством.