

## СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА НАГРЕВА МАТЕРИАЛА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ПОРОШКОВ АЛМАЗА

Докт. техн. наук, проф. ДУДЯК А. И.,  
канд. техн. наук, доц. ЮДЕНКОВ В. С., инж. ЛУБОВСКИЙ О. Л.

*Белорусская государственная политехническая академия*

Процесс синтеза порошков алмаза является весьма чувствительным к начальным параметрам материала шихты, а также к изменению сопротивления спека от температуры, давления и времени синтеза [1, 2]. Для его автоматизации и учета изменяющихся параметров предлагается использовать программируемый логический контроллер (PLC) с многозадачным режимом работы.

**Алгоритм управления процессом нагрева материала образца.** При синтезе порошков алмаза имеется возможность контролировать три параметра, от которых зависит энергия, затрачиваемая на нагрев реакционной смеси: действующие значения тока, напряжения и мощности на образце. Ток и напряжение определяют мощность, расходуемую на нагрев реакционной смеси. Сопротивление электрическому току состоит из сопротивления реакционной смеси  $R_{ш}$  и сопротивления токоподводов  $R_f$ .

Общее сопротивление определяется по формуле

$$R_0 = R_{ш} + R_f. \quad (1)$$

Полагая, что сопротивление токоподводов  $R_f$  в процессе синтеза не изменяется, получим из (1)

$$R_{ш}(t) = R_0(t) - R_f. \quad (2)$$

Общее сопротивление цепи  $R_0(t)$  зависит от времени, температуры и давления и может быть вычислено в микроконтроллере в каждый момент времени по выражению

$$R_0(t) = U(t) / I(t), \quad (3)$$

где  $U(t)$  – напряжение, подводимое к цепи;  $I(t)$  – ток в цепи.

Подставляя (3) в (2), получим

$$R_{ш}(t) = U(t) / I(t) - R_f. \quad (4)$$

В каждый момент времени мощность, расходуемая на нагрев реакционной смеси, определяется выражением

$$W(t) = I^2(t)(R_0(t) - R_f). \quad (5)$$

Полная мощность нагрева с учетом потерь в токоподводах рассчитывается по формуле

$$W_z(t) = I^2(t)R_0(t). \quad (6)$$

Наиболее качественный порошок алмаза получается, если в процессе синтеза мощность, расходуемая на нагрев образца, остается постоянной величиной. Эта величина называется оптимальной начальной мощностью нагрева  $W_H$ . Учитывая (4), можно получить

$$W_H = I_H^2(U_H / I_H - R_t), \quad (7)$$

где  $U_H, I_H$  – начальные напряжение и ток синтеза при заданной общей мощности нагрева  $W_H$ .

Заданная начальная мощность  $W_H$  определяется экспериментально в зависимости от требуемых технологических параметров синтеза (выход порошка алмаза, качество порошка, зернистость и др.).

С панели контроллера задается мощность нагрева шихты  $W_H$ , а управление ведется по закону стабилизации полной мощности нагрева  $W_z$ . Требуемая полная заданная мощность нагрева определится делением (6) на (7) в зоне синтеза в момент времени  $t_0$  (рис. 1)

$$W_z(t_0) / W_H = R_0(t_0) / (R_0(t_0) - R_t). \quad (8)$$

Общее выражение для полной мощности, затрачиваемой на нагрев реакционной смеси, определится из (8) по формуле

$$W_z(t_0) = W_H R_0(t_0) / (R_0(t_0) - R_t). \quad (9)$$

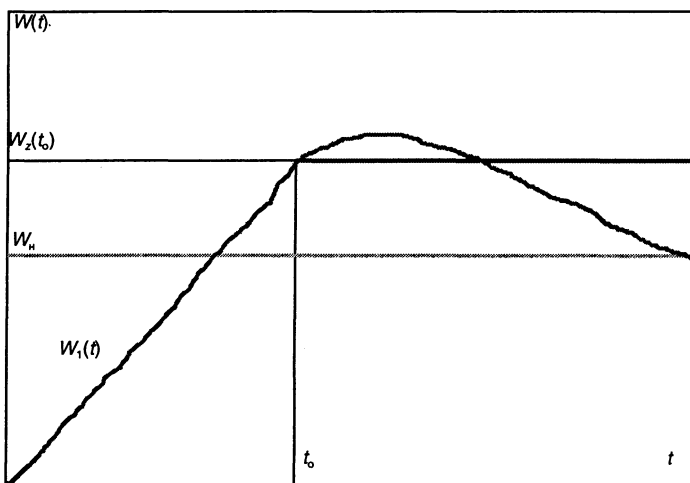


Рис. 1. Изменение мощности нагрева  $W_1(t)$  при синтезе порошка алмаза

В процессе синтеза происходит образование кристаллов алмаза, что приводит к увеличению сопротивления шихты и перераспределению мощности нагрева: мощность нагрева шихты возрастает, а мощность нагрева токоподводов уменьшается при  $W_z(t_0) = \text{const}$ .

Для исключения этого явления необходимо снижать полную мощность нагрева  $W_1(t)$

$$W_1(t) = W_z(t_0) - \Delta W_{ш},$$

где  $\Delta W_{ш}$  – приращение мощности нагрева за счет увеличения сопротивления шихты.

С другой стороны,

$$\Delta W_{\text{ш}} = I_0^2(t_0)R_t - I^2(t)R_t.$$

Окончательно получим

$$W_1(t) = W_z(t_0) - I_0^2(t_0)R_t + I^2(t)R_t. \quad (10)$$

Подставив в (10) выражение (9), получим уравнение задатчика мощности для режима синтеза

$$W_1(t) = W_{\text{н}}R_0(t_0)/(R_0(t_0) - R_t) - I_0^2(t_0)R_t + I^2(t)R_t, \quad (11)$$

где  $I(t)$  — действующее значение тока нагрева;  $I_0(t_0)$  — значение тока нагрева в начале процесса синтеза в момент времени  $t = t_0$ .

Выражение (11) определяет уравнение регулятора мощности, реализованного программно на основе программируемого микроконтроллера.

Алгоритм управления прессом на микроконтроллере фирмы V&R2003 состоит из трех задач, работающих в реальном масштабе времени с различными приоритетами. Задача 1 — управление нагревом образца, задача 2 — управление давлением и циклом движения пресса, задача 3 — ввод/вывод информации и диагностика режимов работы. Задача управления нагревом имеет наивысший приоритет и наименьшее время цикла — 3 мс. Задача управления давлением имеет приоритет ниже и время выполнения — 30 мс. Самый низкий приоритет и наибольшее время цикла — 100 мс имеет задача 3. Связь PLC с объектом управления осуществляется через интерфейсный модуль, включающий в себя аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи и модули дискретных входов/выходов (рис. 2).

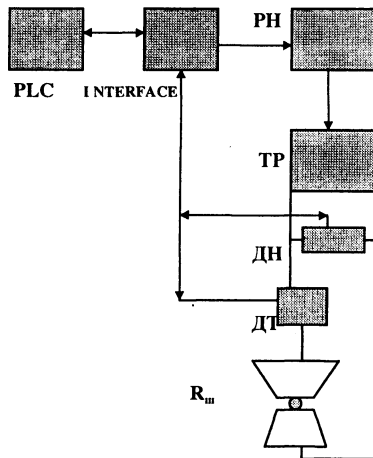


Рис. 2. Структурная схема системы управления нагревом материала

Управление напряжением нагрева производится от тиристорного регулятора напряжения (РН) и сварочного трансформатора (ТР). В системе имеются обратные связи по напряжению и току, реализованные датчиками ДН и ДТ.

Программы задач написаны на языке PL2000 в операционной системе PG2000, разработанной для микроконтроллера фирмой Ver-

peker & Rainer. Дальнейшее повышение качества процесса синтеза алмазов осуществляется с помощью его адаптивной модели, которая используется на начальном периоде процесса управления для определения начальной мощности нагрева  $W_{шн}$ . Укрупненный алгоритм управления процессом синтеза представлен на рис. 3.

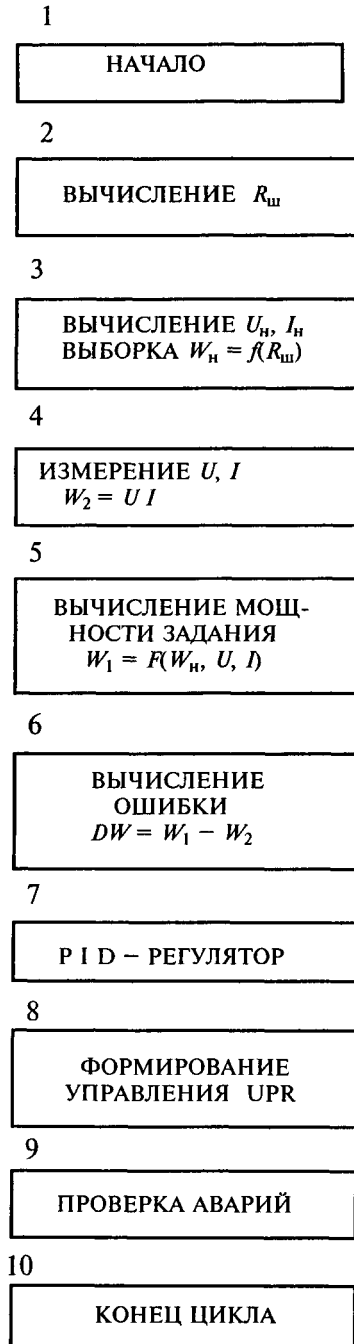


Рис. 3

Блоки алгоритма 2 и 3 выполняются один раз перед началом цикла нагрева. В блоке 4 происходит периодическое измерение действующих

значений напряжения и тока на опорных плитах; в блоке 5 – вычисление мощности на входе; в блоках 6, 7 – отслеживание изменения мощности нагрева по заданному закону. В блоке 8 формируется управляющее воздействие UPR на регулятор напряжения РН в виде шестнадцатиразрядного слова. Блок 9 предназначен для контроля за аварийными ситуациями, возникающими в процессе синтеза алмазов.

**Проектирование системы управления нагревом материала при синтезе порошков алмаза.** Для получения высококачественных кристаллов алмаза следует с большой точностью поддерживать давление и температуру рабочей смеси в заданных пределах. В известных промышленных системах прессов в законе управления реализован алгоритм стабилизационной мощности нагрева. Стабилизация напряжения и тока нагрева в отдельности не дает положительных результатов с точки зрения поддержания постоянства температуры реакционной смеси. Стабилизация мощности нагрева улучшает процесс синтеза, однако с течением времени в результате образования алмаза и увеличения электрического сопротивления реакционной смеси выделяемая в ней мощность увеличивается, что приводит к росту температуры нагрева и в соответствии с фазовой диаграммой попадает в область стабильности графита, а следовательно, происходит процесс превращения алмаза в графит. В предлагаемом алгоритме управления нагревом на базе микроконтроллера в реальном времени учитывается изменение дополнительного сопротивления реакционной смеси, вызванное образованием алмаза. В соответствии с этим увеличением электрического сопротивления понижается по определенному закону полная мощность нагрева так, чтобы мощность, выделяемая в самой реакционной смеси, была постоянной в течение всего процесса синтеза алмаза. Предлагаемый алгоритм управления нагревом позволяет стабилизировать температуру в реакционной смеси и получать крупные, высокопрочные и термостойкие кристаллы алмазного порошка. Структурная схема системы стабилизации мощности нагрева представлена на рис. 4.

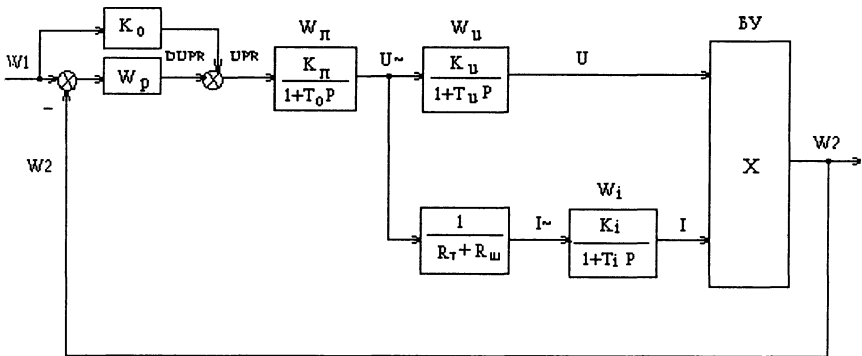


Рис. 4

Система управления имеет три вида нелинейностей:

- 1) нелинейность тиристорного преобразователя  $W_n$ :  $U \sim f(UPR)$ ;
- 2) нелинейная зависимость сопротивления шихты графита от тока нагрева:  $R_{ш} = R_{ш}(I \sim)$ ;
- 3) нелинейность, обусловленная перемножением координат объекта управления, для вычисления мощности нагрева шихты:  $W_2 = U I$ .

Для исключения влияния помех в системе имеются два цифровых фильтра: напряжения  $W_u = \frac{K_u}{1 + T_u P}$  и тока  $W_i = \frac{K_i}{1 + T_i P}$ .

Линеаризация системы осуществляется в точке равновесия:  $W_1 = W_2 = U_0 I_0$  при помощи комбинированного регулятора мощности с передаточными функциями  $K_0$  и  $W_p$ .  $K_0$  обеспечивает вывод траектории системы в заданную точку синтеза, а  $W_p$  — стабилизацию режима нагрева при малых отклонениях мощности  $W_2$  от заданной точки линеаризации.

На основании структурной схемы (рис. 4) составим систему дифференциальных объектов управления:

$$\begin{cases} T_u \frac{dU}{dt} + U(t) = K_u K_{II} U \sim (t) = K_u' U \sim (t); \\ T_i \frac{dI}{dt} + I(t) = \frac{K_i K_{II} U \sim (t)}{(R_T + R_{ш})} = K_i' U \sim (t); \\ W_2 = U(t) I(t). \end{cases} \quad (12)$$

Продифференцировав третье уравнение системы (12), получим

$$\frac{dW_2}{dt} = U(t) \frac{dI}{dt} + I(t) \frac{dU}{dt}. \quad (13)$$

Подставив первые два уравнения системы (12) в (13), получим

$$\frac{dW_2}{dt} = U(t) \frac{1}{T_i} (K_i' U \sim (t) - I(t)) + I(t) \frac{1}{T_u} (K_u' U \sim (t) - U(t)). \quad (14)$$

Преобразовав выражение (14) в дифференциальное уравнение относительно  $W_2 = U(t) I(t)$ , получим

$$\frac{T_u T_i}{T_u + T_i} \frac{dW_2}{dt} + W_2 = \frac{U(t) T_u K_i' + I(t) T_i K_u'}{T_u + T_i} U \sim (t).$$

Обозначив:

$$T_3 = \frac{T_u T_i}{T_u + T_i}; \quad K_w = \frac{U(t) T_u K_i' + I(t) T_i K_u'}{T_u + T_i},$$

получим окончательно систему дифференциальных уравнений объекта:

$$\begin{cases} T_u \frac{dU}{dt} + U = K_u' U \sim (t); \\ T_i \frac{dI}{dt} + I = K_i' U \sim (t); \\ T_3 \frac{dW_2}{dt} + W_2 = K_w(U, I) U \sim (t). \end{cases} \quad (15)$$

Уравнение цифровых фильтров в разностной форме для микроконтроллера V&R 2003 запишем в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_u \frac{U_n - U_{n-1}}{T_c} + U_{n-1} = K_u U \sim (n); \\ T_i \frac{I_n - I_{n-1}}{T_c} + I_{n-1} = K_i I \sim (n). \end{array} \right. \quad (16)$$

Выразим из (16) значения выходных координат фильтров 1-го порядка для напряжения  $U_n$  и для тока  $I_n$ :

$$\begin{aligned} U_n &= \left(1 - \frac{T_c}{T_u}\right)U_{n-1} + K_u \frac{T_c}{T_u} U \sim (n); \\ I_n &= \left(1 - \frac{T_c}{T_i}\right)I_{n-1} + K_i \frac{T_c}{T_i} I \sim (n), \end{aligned} \quad (17)$$

где  $T_c$  – время цикла задачи нагрева для МК V&R 2003 ( $T_c = 2$  мс);

$T_u, T_i$  – постоянные времена цифровых фильтров напряжения и тока соответственно;

$U_{n-1}, I_{n-1}$  – значения напряжения и тока на  $(n-1)$  интервале управления;

$U_n, I_n$  – выходные значения напряжения и тока цифровых фильтров;

$U \sim_n, I \sim_n$  – входные нефильТРованные значения напряжения и тока для  $n$ -го интервала управления.

Так как основное уравнение объекта представляет собой дифференциальное уравнение 1-го порядка с постоянной времени  $T_3$  и переменным коэффициентом усиления  $K_w$ , в качестве регулятора мощности в зоне малых отклонений от точки линеаризации  $I_0$ ;  $U_0$  примем ПИ-регулятор с передаточной функцией по Лапласу

$$W_p = \frac{T_3 P + 1}{K_w T_a P} = \frac{DUPR}{DW}, \quad (18)$$

где  $DUPR$  – приращение управляющего напряжения регулятора;

$DW = W_1 - W_2$  – ошибка по мощности;

$T_a$  – постоянная времени ПИ-регулятора.

Дифференциальное уравнение регулятора нагрева получим из (18), заменив оператор Лапласа  $P = \frac{d}{dt}$ . Тогда

$$K_w T_a \frac{dDUPR(t)}{dt} = T_3 \frac{dDW(t)}{dt} + DW(t). \quad (19)$$

Сущность дискретного управления нагревом от МК поясняется на рис. 5.

Уравнение (19) в конечных разностях для  $n$ -го интервала дискретности МК имеет вид

$$K_w T_a \frac{DUPR_n - DUPR_{n-1}}{T_c} = T_3 \frac{DW_n - DW_{n-1}}{T_c} + DW_n. \quad (20)$$

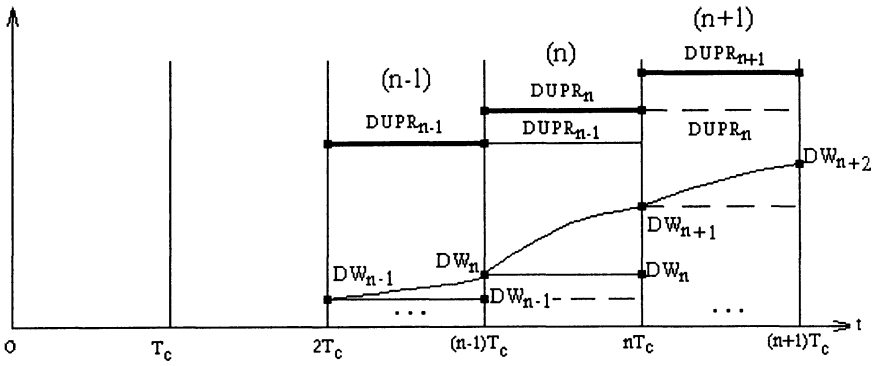


Рис. 5. Диаграмма формирования управления  $DUPR$  для  $n$ -го интервала дискретности МК В&R 2003

Управляющее воздействие на  $n$ -м интервале выразим из (20)

$$DUPR_n = DUPR_{n-1} + \left( \frac{T_c}{K_w T_a} + \frac{T_3}{K_w T_a} \right) DW_n - \frac{T_3}{K_w T_a} DW_{n-1}. \quad (21)$$

Постоянная времени  $T_a$  подбирается при отладке программы на объекте, исходя из заданных показателей качества процесса: быстродействия и точности.

Коэффициент  $K_0$  для комбинированного управления рассчитывается из статического режима в точке равновесия  $I_0, U_0$ :

$$\begin{aligned} U_0 &= K_u U_0^{\sim}; \\ I_0 &= K_i U_0^{\sim}; \\ W_{20} &= U_0 I_0; \\ DW_0 &= W_1 - W_{20} = 0. \end{aligned}$$

Тогда

$$U_0^{\sim} = K_n (DUPR + UPR) = K_n UPR = K_n K_0 W_1 = K_n K_0 W_{20}.$$

С другой стороны, из (15) для установления получим

$$W_{20} = K_w (U_0, I_0) U_0^{\sim} = K_w (U_0, I_0) K_n K_0 W_{20}.$$

Откуда

$$K_0 = \frac{1}{K_n K_w (U_0, I_0)}. \quad (22)$$

Окончательное выражение для управляющего воздействия

$$\begin{aligned} UPR_n = DUPR_n + K_0 W_1 &= DUPR_{n-1} + \left( \frac{T_c}{T_a} + \frac{T_3}{T_a} \right) \frac{DW_n}{K_w (U, I)} - \\ &- \frac{T_3}{T_a} \frac{DW_{n-1}}{K_w (U, I)} + \frac{W_1}{K_n K_w (U_0, I_0)}. \end{aligned} \quad (23)$$

Для плавного захода на режим синтеза необходимо использовать задатчик мощности, формирующий линейный закон нарастания и спада  $W_1(t)$ .

Задатчик мощности является интегрирующим звеном с дифференциальным уравнением



$$W_1(t) = \frac{1}{T_n} \int_0^t W_z dt. \quad (24)$$

Откуда для дискретного варианта получим

$$W_{1n} = W_{10} + \sum_{i=1}^w W_{zi} \frac{T_c}{T_n}, \quad (25)$$

где  $W_{10}$  – начальное значение мощности при  $t = 0$ .

Задатчик спада мощности имеет вид

$$W_{1c} = W_{10} - \sum_{i=i_0}^0 W_{zi} \frac{T_c}{T_p},$$

где  $T_n, T_p$  – постоянные времени нарастания и спада траектории нагрева.

Заданная мощность нагрева  $W_z$  корректируется по формуле (9) и вычисляется в зависимости от полного начального сопротивления цепи нагрева  $R_0$  и сопротивления токоподводов  $R_r$

$$W_z(t_0) = W_n R_0(t_0) / (R_0(t_0) - R_r).$$

### ВЫВОД

Использование предложенного алгоритма управления нагревом позволило стабилизировать температурные условия в реакционной смеси и увеличило время выдержки этой смеси при давлениях и температурах, соответствующих области превращения графита в алмаз. В результате этого улучшилось качество синтезируемых порошков алмаза и увеличился их выход за один цикл прессования. На рис. 6 представлена фотография спека, полученного при синтезе по описанному выше алгоритму.

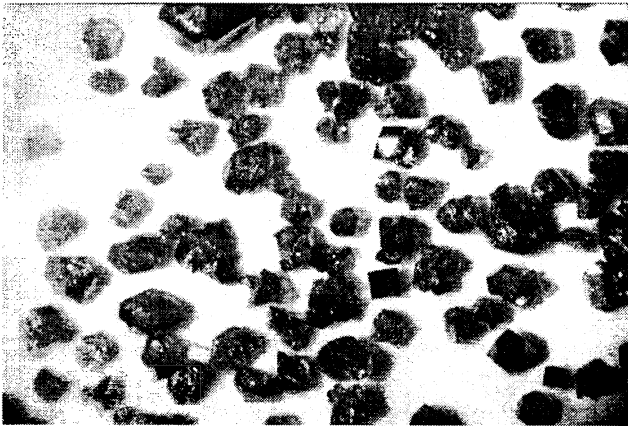


Рис. 6

### ЛИТЕРАТУРА

1. Wolfgang Fritsch Automatisierte Systeme mit Prozess- und Mikroprozessrechnern // VEB Verlag Technik. – Berlin, 1991.
2. Юденков В. С. Синтез системы электропривода постоянного тока с микропроцессорным управлением // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений). – 1985. – № 2. – С. 25–30.

Представлена кафедрой  
ПОВТ и АС

Поступила 26.04.2000