



АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ПО АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ

А.Ю. Глухов, И.В. Негинский (Волгоградский государственный университет)

Приводится краткое описание процесса синтеза иттриевого высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП). Описан аппаратно-программный комплекс управления процессом изготовления высокотемпературных сверхпроводников на основе современной элементной базы. Рассмотрены принципы работы аппаратной и программной частей комплекса, приведены результаты тестирования.

Ключевые слова: терморегулятор, регулирование высоких температур, ПИД-регулирование, микропроцессорная техника, GSM-модуль, беспроводной мониторинг и управление, синтез, высокотемпературные сверхпроводники.

Введение

Стандартная керамическая технология изготовления образцов сверхпроводящей высокотемпературной керамики $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ состоит из нескольких последовательных этапов отжига при различных температурах в течение длительных промежутков времени [1]. В среднем весь процесс термической обработки занимает порядка 72 ч. Метод твердофазного синтеза без обжига в среде кислорода [2] несколько уменьшает продолжительность процесса изготовления (около 50 ч). В рамках обеих технологий требуется как поддержание постоянного уровня температур, так и изменение температуры отжига с заданной скоростью. Таким образом, получение образцов ВТСП керамики требует длительного прецизионного контроля устройств отжига.

Одной из установок для высокотемпературной обработки веществ в различных газовых средах является установка отжига самарий-кобальтовых магнитов «Кос-

мос». Она предназначена для проведения процессов дегазации и термообработки различных веществ методом отжига. Данная установка позволяет проводить термическую обработку при температурах до 1100 °С. Устройство оборудовано механическими средствами формирования разреженной атмосферы в камере, в том числе и форвакуума. Также возможно заполнение камеры различными газами в процессе термообработки.

Однако этот прибор, разработанный в 80-е гг. XX века, допускает только ручное управление режимом работы и не обеспечивает необходимые точность и многообразие температурных режимов. Представляется полезным интерактивное задание режимов термической обработки, включающих определение номинальных значений температуры или скорости ее изменения в указанных временных интервалах. Значительно упростит и обезопасит процесс отжига оперативное оповещение о состоянии процесса термообработки. Одним из вариантов информирования является использование современных средств GSM связи.

Таким образом, актуальна автоматизация имеющихся аппаратных средств с целью получения аппаратно-программного комплекса по изготовлению высокотемпературной сверхпроводящей керамики с применением современных технологий.

Описание аппаратной части комплекса

Аппаратная часть комплекса, структурная схема которой представлена на рис. 1, включает силовой модуль из состава установки «Космос» и оригинальные управляющий и измерительный модули.

В состав силового модуля входят:

- реактор из кварцевого стекла с длиной рабочей зоны 600 мм и внутренним диаметром 110 мм;

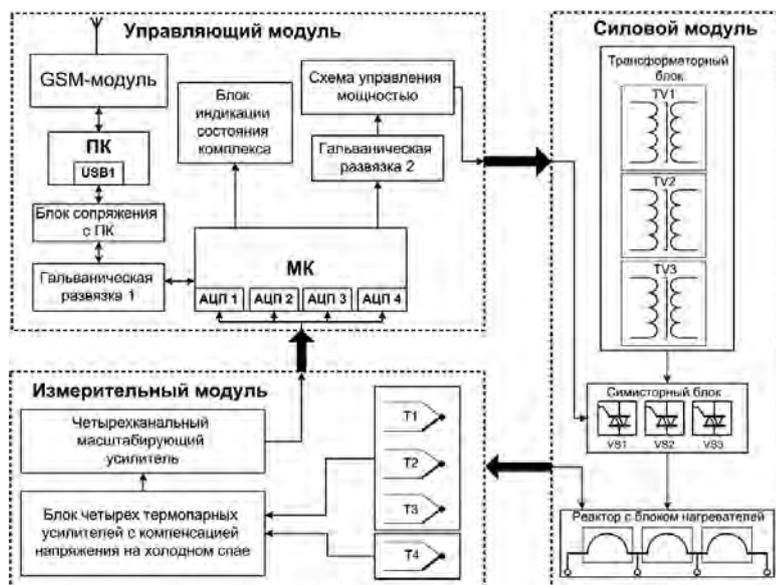


Рис. 1. Структурная схема установки

- блок нагревателей, представляющий собой три последовательно соединенные катушки, расположенные вокруг рабочей камеры реактора;

- симисторный блок, позволяющий управлять током в каждой из трех катушек нагревателя независимо (для центральной катушки — напряжения до 60 В и токи до 60 А, для двух боковых — напряжения до 100 В и током до 120 А);

- блок из трех понижающих трансформаторов с напряжением вторичных обмоток 120 В и током до 120 А.

Оригинальный измерительный модуль предназначен для контроля температуры реактора в нескольких точках. Из-за значительной протяженности зоны реактора датчики рассредоточены по длине реактора: в средних точках у каждого из трех нагревателей и непосредственно в рабочей зоне реактора в месте расположения образцов.

Разработанный управляющий модуль используется для:

- оцифровки выходных сигналов измерительного модуля, пропорциональных температурам в реакторе;

- формирования управляющих сигналов для симисторного блока из состава силового модуля;

- обеспечения связи с ПК посредством интерфейса USB;

- поддержки обмена информацией с оператором установки через GSM канал.

Модуль также дублирует информационные сообщения на дополнительно изготовленную индикаторную панель установки "Космос" (Блок индикации состояния комплекса).

Рассмотрим принципы работы измерительного и управляющего модулей более подробно.

Термопары Т1-Т3 измеряют температуру поверхности реактора. Термопара Т4 погружается непосредственно в рабочую зону реактора. Измерения температуры производятся термопарными преобразователями К-типа (материал положительного термоэлектрода — сплав хромель 90,5% Ni + 9,5% Cr, отрицательного термоэлектрода — сплав алюмель 94,5% Ni + 5,5% Al, Si, Mn, Co). Коэффициент термо-ЭДС в рабочем диапазоне температур (20...1300 °С) составляет 35...42 мкВ/°С.

Блок четырех термопарных усилителей компенсирует напряжения на холодном спае и производит усиление сигналов всех термопар. В качестве термопарных усилителей применяются монолитные контроллеры AD597. Схема настроена таким образом, чтобы обеспечить выходную крутизну преобразования 10 мВ/°С.

Четырехканальный усилитель масштабирует сигналы термопар в соответствии с максимальным и минимальным уровнями сигналов АЦП1-АЦП4. Масштабирование выполнено на основе прецизионных сверхмаломощных (спектральная плотность мощности шума около 1,1 нВ/√Гц) операционных усилителей ОРА211, включенных по схеме неинвертирующего усилителя с коэффициентом передачи 5.

В качестве ядра управляющего модуля использован 8-разрядный микроконтроллер фирмы ATMEGA16. Данный микроконтроллер имеет всю необходимую периферию для применения в разработанном комплексе:

- четыре встроенные 10-разрядные АЦП для получения цифрового кода температур;

- встроенную память объемом 16 Кб для хранения программного кода, анализирующего отсчеты АЦП и вычисляющего управляющие воздействия на Силовой модуль.

- встроенный COM-интерфейс для связи с ПК и внутрисхемного программирования.

В связи со значительными статическими потенциалами предусмотрена гальваническая развязка микроконтроллера как с ПК, так и с силовым модулем. Сопряжение с компьютером выполнено на основе моста USB-UART фирмы Silicon Laboratories CP2102 и микросхемы гальванической развязки фирмы Analog Devices ADUM1301. Данная модель преобразователя интерфейсов USB-UART имеет значительный размер буферов приема/передачи (576/640 б) и более высокую степень интеграции по сравнению с аналогичными устройствами (например, FT232BM). Малогабаритный цифровой изолятор ADUM1301 представляет собой устройство на базе высокоскоростной КМОП-схемы и монолитного трансформатора без сердечника. К его достоинствам можно также отнести наличие нескольких независимых каналов передачи данных.

Для управления симисторами силового блока используется еще один гальванически независимый канал связи (гальваническая развязка 2 и схема управления мощностью). Для формирования сигналов управления симисторами силового модуля используется схема управления мощностью с гальванической развязкой 2, выполненная на базе специализированных микросхем фирмы Sharp S216S02.

Для обеспечения обмена информацией с оператором установки использован GSM/GPRS модем GR-64, подключенный к ПК с помощью COM-порта. Данная конструкция устройства обеспечивает двухсторонний обмен данными — позволяет как передавать информацию на заданный номер абонента GSM, так и принимать от него команды управления комплексом.

Программная часть комплекса

Программная часть комплекса имеет две составные части — управляющая программа для микроконтроллера и интерфейсная программа на ПК. При этом на микроконтроллер возложены задачи установления и поддержания целевой температуры в реакторе. Задание этой температуры проводится интерактивно в интерфейсной программе для ПК.

Программа для микроконтроллера выполняет общее управление аппаратной частью комплекса, а именно контролирует следующие функции:

- прием данных о температурах от измерительного блока, их оцифровку 10-разрядным АЦП МК;

- расчет выходного воздействия на схему управления мощностью;
- обмен данными с ПК посредством последовательного СОМ-интерфейса (через аппаратно-независимый преобразователь USB-UART).

Стабилизация температуры производится программно по классическому ПИД-закону регулирования [3, 4]. Особенностью схемы является дискретный алгоритм формирования выходной мощности, реализованный за счет изменения числа полупериодов сетевого напряжения, переданного на симисторный блок за отчетный интервал времени. Один полупериод сетевого напряжения соответствует минимальной порции энергии. Полное заполнение отчетного интервала полупериодами сетевого напряжения соответствует максимальной выделяемой мощности.

Для расчета выделяемой мощности в микроконтроллере использовались соотношения (1) и (2):

$$P(t_1, t_2) = \frac{k_p (T_{ycm} - T_1) + \frac{1}{k_i} (t_2 - t_1) \frac{[2T_{ycm} - T_1 - T_2]}{2} + k_d \frac{[T_1 - T_2]}{(t_2 - t_1)}}{P_0(t_{01}, t_{02})} 100\%, \quad (1)$$

$$P_0(t_{01}, t_{02}) = k_p (T_{ycm} - T_{01}) + \frac{1}{k_i} (t_{02} - t_{01}) \cdot \frac{[2T_{ycm} - T_{01} - T_{02}]}{2} + k_d \frac{[T_{01} - T_{02}]}{(t_{02} - t_{01})}. \quad (2)$$

где k_p , k_i и k_d — пропорциональная, интегральная и дифференциальная составляющие ПИД-закона регулирования, T_{ycm} — целевая температура, T_1 и T_2 — отсчеты температуры, взятые через интервал времени, соответствующий максимальной выделяющейся мощности, t_1 и t_2 — отсчеты времени, соответствующие максимальной выделяющейся мощности.

Числитель формулы (1) нормируется на значение мощности P_0 при температурах T_{01} и T_{02} . Такая нормировка позволяет устанавливать стартовый уровень температуры, начиная с которого производится расчет выделяющейся мощности согласно ПИД-закону регулирования. Данное значение подбирается экспериментально исходя из наилучшего переходного процесса регулирования.

Таким образом, для реализации этого алгоритма регулирования необходимо экспериментально подобрать следующие параметры: коэффициенты ПИД-регулирования k_p , k_i и k_d , значение P_0 , минимальный и максимальный интервал выделяемой мощности.

Для настройки коэффициентов ПИД-регулирования применяются две методики Цидлера [5]. Первая из методик служит для первоначальной оценки данных параметров. Для этого объект регулирования включается на полную мощность. После достижения установившегося режима с максимальной температурой T_{max} по переходному процессу определяют:

— t_0 — время транспортного запаздывания, то есть время достижения температуры $0,1 T_{max}$;

- t_i — время согласования, время достижения температуры $0,63 T_{max}$ начиная с момента времени t_0 ;
- R — наклон кривой разгона (максимальная скорость изменения температуры).

После этого рассчитываются коэффициенты ПИД-регулирования согласно соотношениям:

$$k_p = \frac{1,2}{R t_0}, \quad k_i = 2 t_0, \quad k_d = 0,4 t_0 \quad (3)$$

Более точная настройка осуществляется по второй методике, согласно которой система переводится в режим двухпозиционного регулирования по релейному закону. Определяются амплитуда A и период колебаний t_c . Коэффициенты настройки вычисляются согласно следующим соотношениям:

$$k_p = \frac{0,55}{A}, \quad k_i = 0,5 t_c, \quad k_d = 0,12 t_c \quad (4)$$

Значение интервала времени 100 мс соответствует минимальной порции энергии, а 10 с — максимальной. Все эти значения являются первым приближением и определены экспериментально.

Блок-схема программы микроконтроллера, реализующая данный алгоритм представлена на рис. 2. Первоначально происходит установка параметров работы АЦП, счетчика временных интервалов и асинхронного приемопередатчика UART. Затем программа переходит в режим ожидания прерываний либо от АЦП, либо от внутреннего счетчика.

При возникновении прерывания АЦП, соответствующего готовности отсчетов температуры, происходит считывание и преобразование данных АЦП в температуру и передача полученных значений в ПК через преобразователь USB-UART.

Каждые 100 мс происходит прерывание внутреннего счетчика контроллера и формирование управляющих импульсов в Симисторный блок в зависимости от значения выходной мощности P :

- при $P > 100\%$ в нагрузку выделяется 100% мощности за 10 с подачи высокого логического уровня на соответствующий бит порта микроконтроллера;
- при $P \leq 0\%$ в нагрузку выделяется 0% мощности.

— при промежуточном значении и формируется импульс длительностью, пропорциональной значению P ;

По прерыванию внутреннего счетчика каждые 10 с происходит вычисление разности между целевым и измеренным значениями температуры. Далее реализуется расчет необходимой мощности P .

Пример внешнего вида интерфейсной программы для ПК представлен на рис. 3 и 5. Программа оформлена в виде трех вкладок: настройка СОМ-порта, ручное управление и автоматическое управление.

Основной является вкладка "Автоматическое управление", где производится задание временной зависимости температур. Первоначально задается целевая температура реактора. После нажатия кнопки "Установить" пакет данных с заданной температурой передается в микроконтроллер для обработки. Далее

Тестирование комплекса

Результаты тестирования аппаратно-программного комплекса с целью определения экспериментальных параметров установки и ее калибровки представлены на рис. 3–6. Исходные данные для тестирования аппаратно-программного комплекса выбирались, исходя из рабочих характеристик реактора с блоком нагревателей установки отжига самарий-кобальтовых магнитов УО. МГП-1 (ТУ 11-ПЕЕМ2.030.007-86). На рис. 3 представлена кривая разгона реактора с блоком нагревателей. При этом на графике зависимости температуры от времени в данном случае представлена только температура внутри рабочей зоны реактора. Видно, что время выхода на заданную целевую температуру составляет около 25 мин. Исходя из зависимости кривой разгона, были определены первые приближения коэффициентов ПИД-регулирующего согласно формулам (3).

Для уточнения значений коэффициентов ПИД-регулирующего, согласно соотношениям (4), система переводилась в "ступенчатое" нагревание (рис. 4) 400...950 °С с шагом по температуре 50 °С и шагом по времени 15...20 мин.

На рис. 5 представлен увеличенный фрагмент временной зависимости температуры в режиме стабилизации. При этом температура внутри рабочей зоны реактора составляет 945 °С, на поверхности реактора по краям и в центре — 946...947 °С соответственно. Среднеквадратичное отклонение температуры 1,5 °С или около 0,16%.

Кривая естественного остывания реактора приведена на рис. 6. Исходя из этой кривой, рассчитаны коэффициенты ПИД-регулирующего, для процесса остывания, соответствующие технологии изготовления сверхпроводящей керамики. Данные коэффициенты рассчитаны в соответствии с методом [3].

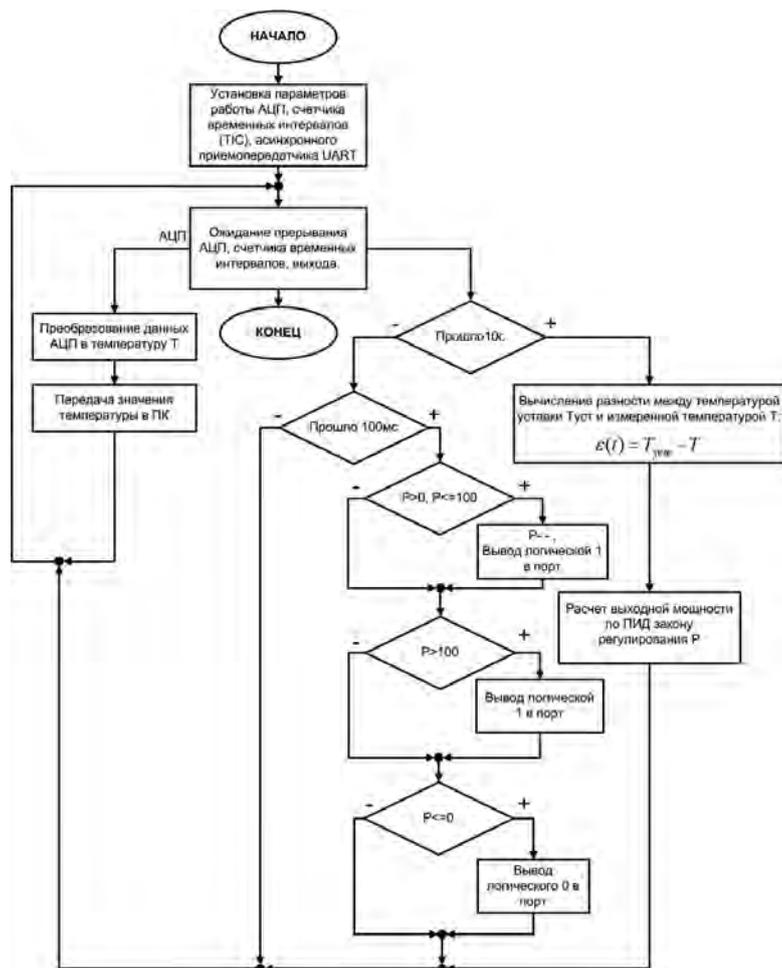


Рис. 2. Блок-схема алгоритма работы программы микроконтроллера

становятся активными кнопки "Старт регулирования" и "Старт остывания". При активации одного из этих режимов запускаются соответствующие процессы регулирования нагрева или остывания. При этом программа переходит в режим приема четырех оцифрованных температур с термопар реактора. Все четыре температуры выводятся на график временных зависимостей температур. Также текущие числовые значения всех четырех температур из каждой зоны реактора выводятся в поле "Текущие значения". При нажатии кнопки "Стоп" процесс регулирования останавливается.

Ручное управление предназначено для тестирования всех частей аппаратно-программного комплекса, а именно: независимого включения/выключения симисторов силового блока, одновременного получения отсчетов температуры и т. д.

Вкладка программы "Настройка COM-порта" предназначена для настройки параметров подключения аппаратной части установки к ПК. На закладке задаются номер порта UART, к которому подключено устройство, скорость передачи, биты данных, четность, стоповые биты и другие параметры COM-порта.

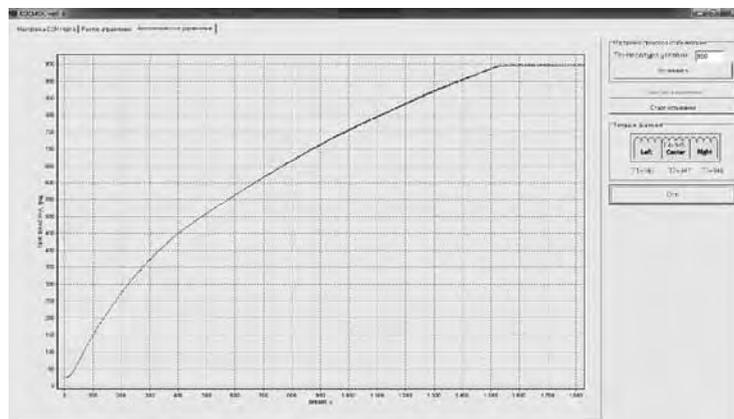


Рис. 3 Интерфейс программы для ПК при получении кривой разгона реактора

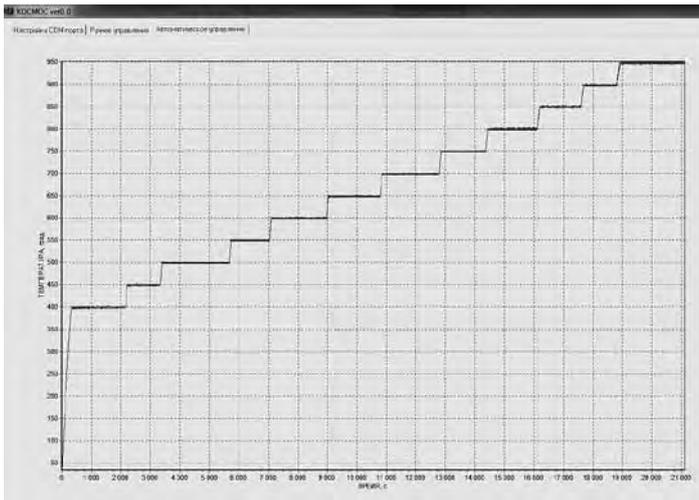


Рис. 4. Рабочее окно программы в режиме "ступенчатого" нагрева

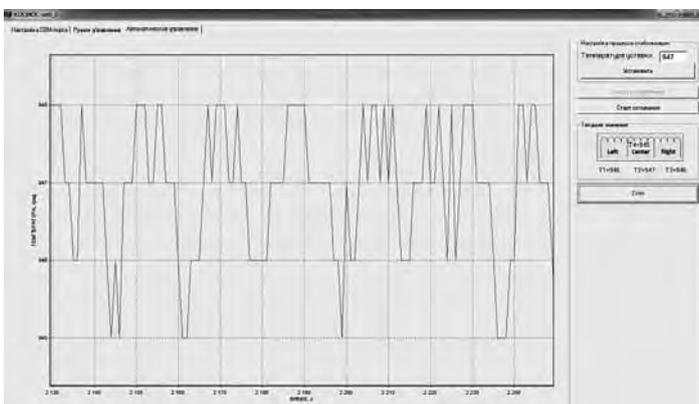


Рис. 5. Рабочее окно программы в режиме стабилизации температуры

Применение комплекса для спекания образцов ВТСП керамики

Процесс синтеза иттриевого высокотемпературного сверхпроводника проводился в специализированной лаборатории «Технологии изготовления сверхпроводников» кафедры радиофизики Волгоградского

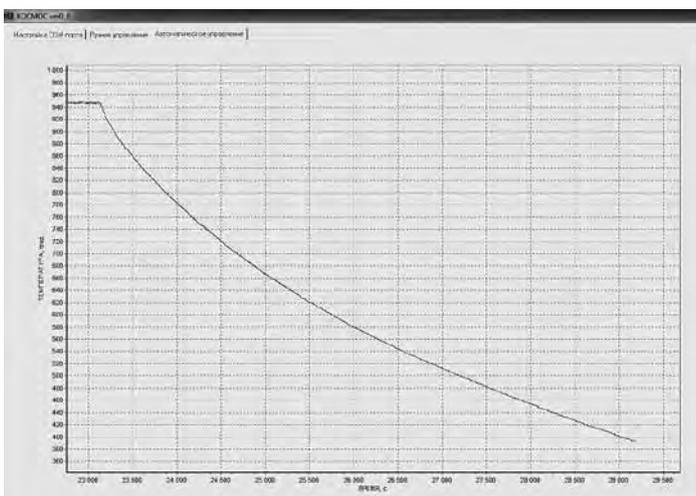


Рис. 6. Рабочее окно программы в режиме естественного остывания

государственного университета согласно методу твердофазного синтеза без обжига в среде кислорода [2]. Для синтеза используются смеси оксидов $YBaCuO$.

Согласно технологии на первом этапе смесь оксидов подвергается термической обработке в четыре последовательных стадии по 6 ч каждая при температурах 900, 910, 920 и 930 °C.

Отожженный порошок используется для формирования экспериментальных образцов нужной формы. Для этого в смесь добавляются различные пластификаторы — машинное масло, солидол и т. д. Прессование производится в несколько этапов по 30 мин под давлениями соответственно — 2, 3 и 4 т/см². Спрессованные образцы высушиваются при температуре 250 °C в течение 4 ч.

На следующем этапе образцы спекаются на открытом воздухе при температуре 900 °C в течение 12 ч.

Процесс охлаждения состоит из двух этапов: контролируемый со скоростью 1 °C/мин в течение 3 ч и свободного (естественного охлаждения).

Окончательный обжиг производится в течение 3 ч при 400 °C на открытом воздухе.

С помощью разработанного и изготовленного аппаратно-программного комплекса по автоматизации процесса изготовления высокотемпературных сверхпроводников были получены 10 цилиндрических образцов длиной 30 мм и диаметром 12 мм. Синтезированные сверхпроводники обнаруживали значительный эффект Мейсснера-Оксенфельда.

Выводы

Разработан и изготовлен аппаратно-программный комплекс по автоматизации процесса изготовления высокотемпературных сверхпроводников. Проведена калибровка и тестирование всего комплекса в интервале рабочих температур. Основные технические характеристики комплекса представлены в таблице.

Данная система применялась для изготовления ВТСП-керамики в лаборатории «Технологии изготовления сверхпроводников» физико-технического института Волгоградского государственного университета. Использовался метод твердофазного синтеза без обжига в среде кислорода образцов иттриевой высокотемпературной керамики состава $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ [2]. Автоматизация данной технологии позволила существенно упростить процесс изготовления образцов. В результате исследования полученных образцов были сделаны выводы о соответствии некоторых электромагнитных свойств с известными из литературы результатами [6–8]. Это позволяет сделать вывод, что «Аппаратно-программный комплекс по автоматизации процесса изготовления высокотемпературных сверхпроводников» применим для изготовления образцов.

Таблица. Основные технические характеристики аппаратно-программного комплекса по автоматизации процесса изготовления высокотемпературных сверхпроводников

Параметр	Значение
Диапазон температур рабочей зоны реактора, °С	200...1000
Нестабильность поддержания установившейся температуры в любой точке рабочей зоны, °С	±1,5
Относительная погрешность задания температур в любой точке рабочей зоны, %	0,15...0,3
Сопряжение с ПК	USB
Беспроводной мониторинг и управление	Посредством SMS-сообщений
Гальваническая развязка силовой, измерительной частей и ПК	Да
Закон регулирования	ПИД
Четыре термопреобразователя ректора с компенсацией напряжения на холодном спае	Термопары К-типа
Автономная работа	Да

На данный комплекс в федеральной службе по интеллектуальной собственности (РОСПАТЕНТ) был получен патент на полезную модель «Устройство для автоматического регулирования температуры с беспроводным управлением».

Список литературы

1. Finkel' V.A., Arzhavitin V.M., Blinkin A.A., Derevyanko V.V., Razdovskii Yu.Yu.. The influence of weakly bonded oxygen

Глухов Андрей Юрьевич – аспирант, Негинский Игорь Владимирович – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры радиофизики Волгоградского государственного университета, физико-технического института. Контактный телефон (8442) 46-08-10. E-mail: GaufrRF@gmail.com

2. on the crystal structure, electrical and relaxation properties of HTSC $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ceramics // PhysicaC. p. 303-304. V 235-240, part 1, 1994.
2. Полонский Ю.А., Суворов С.А., Егоров Н.Ю. и др. Синтез иттриевых высокотемпературных сверхпроводников $YBa_2Cu_3O_{6,89}$ с $T_c=91$ К без обжига в среде кислорода // Материалы Всероссийского электротехнического конгресса ВЭЛК. 2005. М.: МЭИ. 2005.
3. Зайцев Г.Ф. Теория автоматического управления и регулирования. 2-е изд., перераб. и доп. К.: Высшая школа. Главное изд. 1989.
4. Денисенко В.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. – М.: Горячая линия-Телеком, 2009.
5. Михайлов В.С. Теория управления. К.: Высшая школа. Главное издательство, 1988.
6. Кузьмичев Н.Д., Федченко А.А. Намагниченность коротких цилиндров жестких сверхпроводников второго рода и карта распределения экранирующего тока в модели Бина // ЖТФ. 2012. Т. 82. Вып. 5.
7. Славкин В.В., Тищенко Э.А. Установка для исследования нелинейных магнитных свойств высокотемпературных сверхпроводников с помощью гармоник немагнитности // ЖТФ. 2012. Т. 82. Вып. 10.
8. Головашкин А.И., Кузьмичев Н.Д., Славкин В.В. Управление формированием гармоник на основе $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ // ЖТФ. 2008. Т. 78. Вып. 1.

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС «КРУТОЙ ЗАМЕС ЕХ» ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ РЕНТАБЕЛЬНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА

Компания «АВС – МК»

Представлены состав и функциональные особенности программно-аппаратного комплекса «Крутой замес ЕХ», предназначенного для внедрения на бетонных, асфальтобетонных и комбикормовых заводах.

Ключевые слова: программно-аппаратный комплекс, интеграция, универсальный пульт управления, бизнес-процессы.

Программно-аппаратный комплекс (ПАК) «Крутой замес ЕХ» разработан производственно-инжиниринговой компанией «АВС – МК» и предназначен для применения на бетонных, асфальтобетонных или комбикормовых заводах. Интеграция ПАК «Крутой замес ЕХ» с автоматизированной системой управления производством (АСУП) завода позволяет существенно повысить рентабельность за счет создания единой информационной производственной среды на базе «1С Предприятия 8».

Назначение системы:

- интеграция с контрольно-измерительными приборами уровня ТП предприятия;
- сбор и обработка данных уровня ТП;
- управление ТП посредством ПО класса SCADA, развертываемом на универсальном пульте управления;
- автоматизация бизнес-процессов уровня управления производством с обеспечением оптимального режима работы оборудования

– интеграция с ERP «1С бухгалтерия» или выгрузка требуемых данных для использования в других ERP-системах.

Преимущества ПАК «Крутой замес ЕХ»:

- централизованный контроль над всей производственной цепочкой завода;
- интеграция всех производственных и складских операций в единой информационной среде;
- непрерывная обратная связь с аппаратной составляющей уровня ТП;

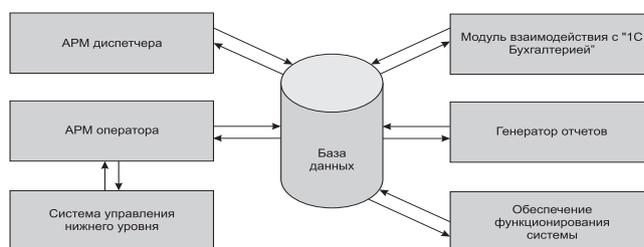


Рис. 1