

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
им. Г.И. Будкера СО РАН

А.М. Батраков, Б.Р. Карымов, Д.С. Шичков

АВТОМАТИЗАЦИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ
ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ УЗЛОВ
ФИЗИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

ИЯФ 2003-55

НОВОСИБИРСК
2003

Автоматизация технологического оборудования для термической обработки узлов физических установок

А.М. Батраков, Б.Р. Карымов, Д.С. Шичков

Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера
630090 Новосибирск, Россия

Аннотация

Заметная часть физического оборудования, изготавливаемого в ИЯФ СО РАН как по контрактам с различными физическими центрами, так и для собственных исследований, требует специальной термической обработки элементов и узлов этого оборудования. Для управления технологическими установками термической обработки в лаборатории 6-1 разработано несколько автоматизированных систем. В препринте описываются аппаратные и программные средства систем управления технологическим оборудованием для термической обработки.

Computer based control of heat treatment manufactory equipment for physical devices production

A. Batrakov, B. Karymov, D. Shichkov

Budker Institute of Nuclear Physics
630090, Novosibirsk, Russia

Abstract

A lot of physical equipment produced in Budker INP demands of special heat treatment during manufacturing. Computer based systems to control heat treatment process installations were built up in Lab.6-1 of BINP. The paper describes the electronics and software designed for these systems.

Введение

Заметная часть физического оборудования, изготавливаемого в ИЯФ СО РАН как по контрактам с различными физическими центрами, так и для собственных исследований, требует специальной термической обработки элементов и узлов этого оборудования. Здесь можно упомянуть спекание линз и поворотных магнитов из шихтованного железа (линзы PSI, магниты SAGA, корректоры MCIA), отжиг сверхпроводящих катушек из ниобий-олова (10-Т вигглер для SPring-8, Супербенд для BESSY-II, сверхпроводящий соленоид ВЭПП-2000), пайка и полимеризация 16-м сверхпроводящих шин и 6-м SSS-шин для LHC, прогрев аэрогеля, пайка радиационно-стойких катушек для PSI и т.п.

Во время обработки температура изделий изменяется по определенному закону и во многих случаях с соблюдением некоторых дополнительных условий. Как правило, термические технологические процессы занимают время от одного часа до нескольких недель, их особенности чаще всего требуют знания и регулирования температур в нескольких точках изделия, и, кроме того, слежения за динамикой температур.

Существенным моментом в подобных работах является также и то, что каждый раз процесс создания технологии термической обработки сопровождается подбором и опробованием различных температурных режимов, что влечёт за собой необходимость гибкой, оперативной перестройки этих режимов.

Сказанное выше объясняет желание возложить на компьютер функции управления технологическими установками для термической обработки изделий, визуализации температурных полей, архивирования данных. Причем хотелось бы, чтобы автоматизированные системы управления технологическим оборудованием для термической обработки относительно легко перенастраивалась под различные задачи.

Для примера опишем подробнее некоторые из упомянутых выше работ.

Простейшей технологической установкой для термической обработки является печь для отжига аэрогеля. Этот материал используется в таких детекторах частиц, как Черенковские счетчики. В процессе изготовления аэрогель пропитывается различными химическими соединениями (спирты и прочие). Кроме этого, при последующих операциях он поглощает воду из атмосферы, что также ухудшает его свойства. Эти соединения необходимо выпарить из него или сжечь, чтобы аэрогель приобрел необходимые

плотность и прозрачность. С этой целью аэрогель помещают в оборудованную вытяжкой печь, работающую при нормальном давлении, нагревают до температуры 550°C и выдерживают при этой температуре 7 часов. Размер прогреваемой камеры 0.3×0.3×0.5 м, необходимая мощность 3 кВт обеспечивается одним нагревателем, используется хромель-алюмелевая термопара, точность регулировки температуры ±3°C.

Более сложным процессом с точки зрения системы управления является отжиг ниобий-оловянных (Nb-Sn) сверхпроводящих катушек. Катушки из ниобий-оловянного провода изготавливаются для получения таких магнитных полей, которые уже недостижимы при использовании хорошо известного провода из ниобий-титана.

Для того чтобы провод из Nb-Sn приобрел сверхпроводящие свойства, его необходимо отжечь с соблюдением определённого температурного графика и с дополнительными требованиями к вакууму в прогреваемой камере. В этой связи отжиг проводится в специально изготовленном контейнере, помещённом в вакуумный объём. (Рис.1а и Рис.1б.). На внутренней стенке контейнера размещены два нагревателя мощностью 2.7 кВт каждый. Хромель-алюмелевые термопары крепятся на корпусе прогреваемой катушки.

Нагрев должен производиться по графику, показанному на Рис.2, и со скоростью не выше 30°C в час. Кроме того, при температуре выше 450°C, где начинается активная стадия отжига, вакуум в печи должен поддерживаться лучше, чем 10^{-2} Па.

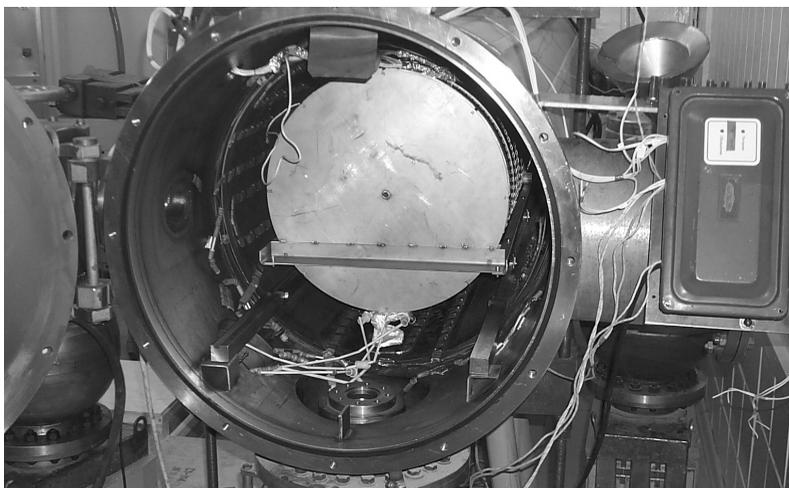


Рис. 1а. Вид вакуумного объёма с установленным контейнером. Модуль управления закреплён справа на корпусе вакуумного объёма.

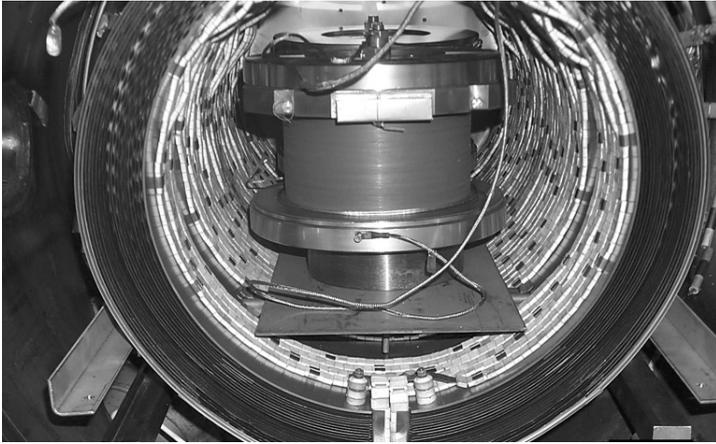


Рис. 16. Подготовленная к отжигу катушка помещена в контейнер; видна закреплённая на корпусе катушке термопара.

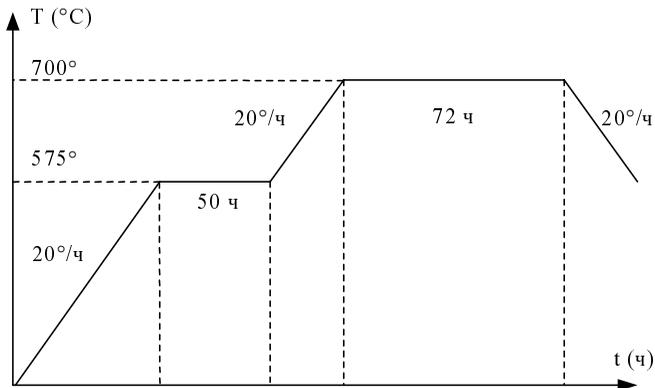


Рис. 2. График отжига сверхпроводящих катушек из Ni-Sn.

Существенным моментом процесса отжига сверхпроводящей катушки является его длительность – около 150 часов, а также заметная стоимость самого изделия и материалов. Это накладывает серьёзные требования к надёжности и технологической установке, и системы управления.

Сложной с точки зрения системы автоматизации задачей является управление линией пайки сверхпроводящих шин (Bus Bars). Эти шины предназначены для подведения питания к сверхпроводящим магнитам на крупнейшем ускорителе LHC (CERN). Bus Bar – это медная 14-метровая шина прямоугольного сечения, которая изогнута определенным образом. Во внутреннюю полость шины вставляется сверхпроводящая жила, изготовленная из Nb-Ti. Сечение сверхпроводящей жилы невелико, и в

случае срыва сверхпроводимости протекающий по ней ток, составляющий несколько десятков килоампер, должен быть вытеснен на внешнюю медную оболочку, рассеивающую большую выделяющуюся мощность. Перехват тока на внешнюю оболочку будет эффективен, если обеспечен хороший электрический контакт между поверхностью сверхпроводника и внутренней поверхностью медной оболочки. Для этого все внутренние полости Bus Bar'a должны быть пролужены и заполнены олово-серебрянным припоем. Эту операцию выполняют на линии пайки, для чего всю шину нагревают до температуры 245° и прокачивают несколько раз расплавленный припой из одного конца шины в другой. Особенности технологии требуют строго определённой динамики температур и распределения температур вдоль шины. На рис.3 показана линейная часть линии пайки, представляющая собой теплоизолированный прогреваемый лоток. Кроме прямого участка, в состав линии пайки входит набор съёмных нагревателей, устанавливаемых на изогнутые участки шины. Автоматизированная система управляет 31 стационарными нагревателями и 13 съёмными нагревателями. Точность установки температур $\pm 2^\circ$ Потребляемая линией мощность составляет около 39 кВт.

Помимо процесса пайки в технологии изготовления Bus Bars присутствует еще один этап, на котором производится термическая обработка шины. На этом этапе изготавливается ее электрическая изоляция. Шину, предварительно обмотанную пропитанной эпоксидной смолой лентой, помещают в пресс-форму, которая прогревается до температуры 170°. Для того, чтобы избежать подвижек шины относительно пресс-формы, темп нагрева не должен превышать 80°/час. Пропитка ленты под действием температуры сначала разжижается, а затем начинается процесс полимеризации, который длится около 3-х часов, после чего нагрев пресс-формы выключается, и она остывает нерегулируемым образом.

Автоматизированная система содержит 14 каналов управления и одновременно управляет тремя установленными рядом пресс-формами для различных типов шин.

Очень интересным примером является установка для изготовления магнитных элементов из шихтованного железа методом спекания. Магнитные элементы, выполненные по этой технологии, помимо хороших электрических характеристик могут иметь сложную конфигурацию и обладают малыми механическими допусками. В установке используется промышленная печь типа ЗЮЛ-606.227.У4 с размерами камеры 3x18x2 м. Магнит собирается в специальном стапеле из отштампованных с высокой точностью листов стали, покрытых эпоксидным компаундом. Затем стапель с магнитом помещается в печь и прогревается по определённому закону. В результате температурного воздействия покрытие листов размягчается, и за счёт давления со стороны стапеля они спрессовываются. При температуре 180°, на которой начинается полимеризация, изделие выдерживается 1час,

после чего выполняется плавный (чтобы исключить температурные градиенты) спуск температуры. Спекание магнитных элементов весом несколько сотен килограмм требует около 20 часов, при больших массах магнитов длительность процесса может доходить до нескольких суток. На рисунке 4 показана печь с подготовленным к отжигу стапелем с поворотным магнитом для японского накопителя “SAGA”.



Рис. 3. Сверху – Bus-Bar’ы с запаянным сверхпроводником; на поверхности шины уложена электрическая изоляция. Снизу – линейная часть линии пайки; на заднем плане виден тигель, служащий источником/приёмником расплавленного припоя.

Приведённые примеры демонстрируют большое разнообразие технологических установок для термической обработки. Тем не менее, для построения всех систем использованы одни и те же аппаратные средства. Эти средства описаны в последующих разделах. Разумеется, что управляющие программы различны для различных технологий, хотя и содержат много общих элементов. Программные средства также описаны в соответствующем разделе.

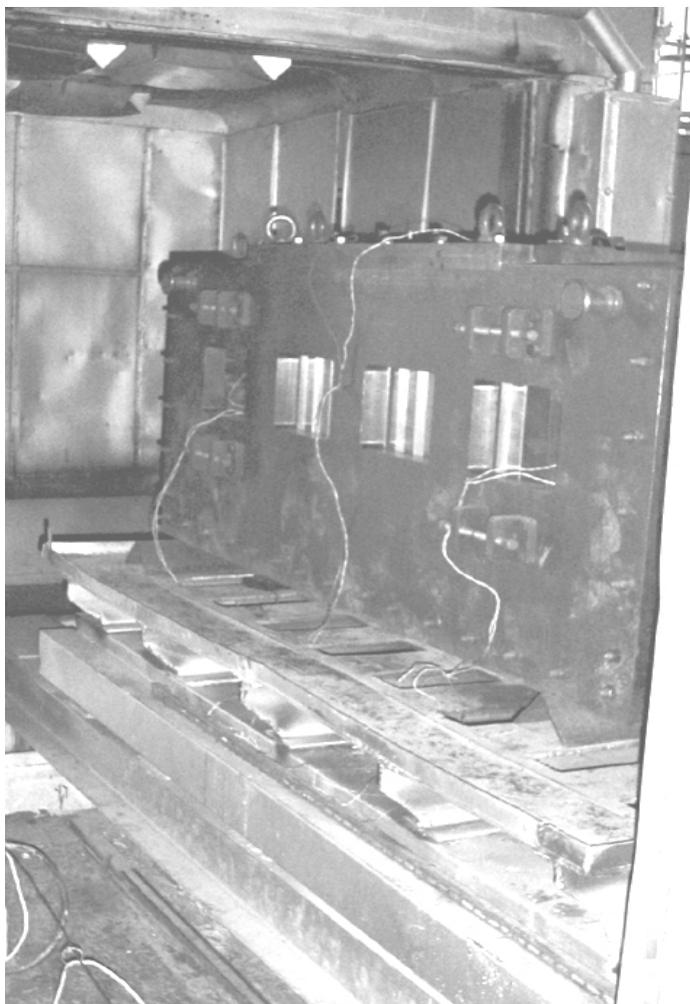


Рис. 4. Печь для спекания магнитных элементов большой массы. На платформе установлен стапель с подготовленным к прогреву магнитом из шихтованного железа. Вес магнита – около 4 т.; вес стапеля – около 5 т.

Обобщённая структура систем управления

Аппаратная часть систем управления технологическими установками для термической обработки базируется на специально разработанных для этих целей унифицированных модулях управления. В наиболее общем виде структура автоматизированной системы показана на рисунке 5.

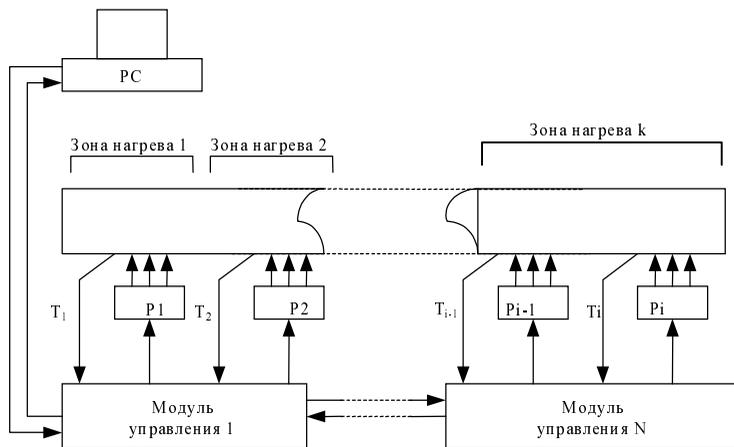


Рис. 5. Обобщённая структура системы управления установкой для термической обработки.

Нагреваемое изделие разбивается на зоны нагрева, каждая из которых слабо связана по теплопередаче с соседней зоной. Каждая зона нагревается отдельным локальным нагревателем P_i . Температура в зоне нагрева измеряется отдельной локальной термодпарой T_i . Нагреватель P_i и термодпара T_i образуют один локальный канал управления. Модуль управления содержит до 4-х локальных каналов. Помимо температурных, в модуль управления могут быть заведены сигналы от других источников, предоставляя возможности регулировать температуру с учётом дополнительных условий.

В тех случаях, когда изделие не может быть разбито на отдельные зоны, или мощности одного нагревателя не хватает для достижения нужной температуры, в один канал управления могут быть объединены одна термодпара и несколько нагревателей (P_{i-1}, P_i).

Электроника канала управления размещается в модулях управления, объединённых в систему с помощью последовательного канала связи. Работой системы управляет персональный компьютер с соответствующим программным обеспечением. Автоматизированная система может включать в свой состав до нескольких десятков модулей управления, разнесённых территориально на 30 – 40 м.

Модуль управления

Структурная схема модуля управления приведена на Рис.6. Электроника модуля управления размещена на двух платах (см. Рис.7).

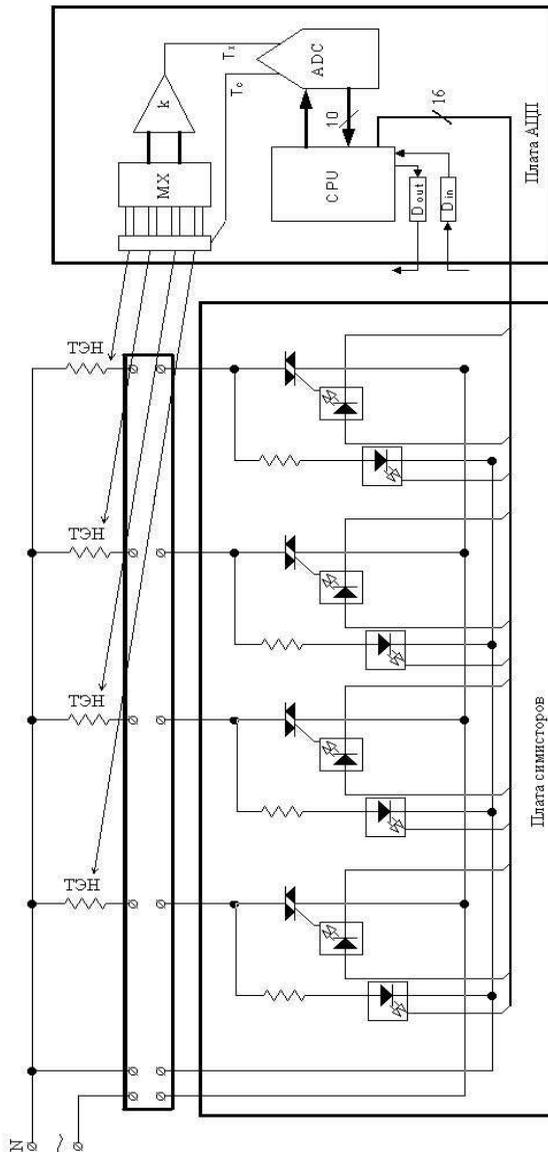


Рис. 6. Структурная схема модуля управления.

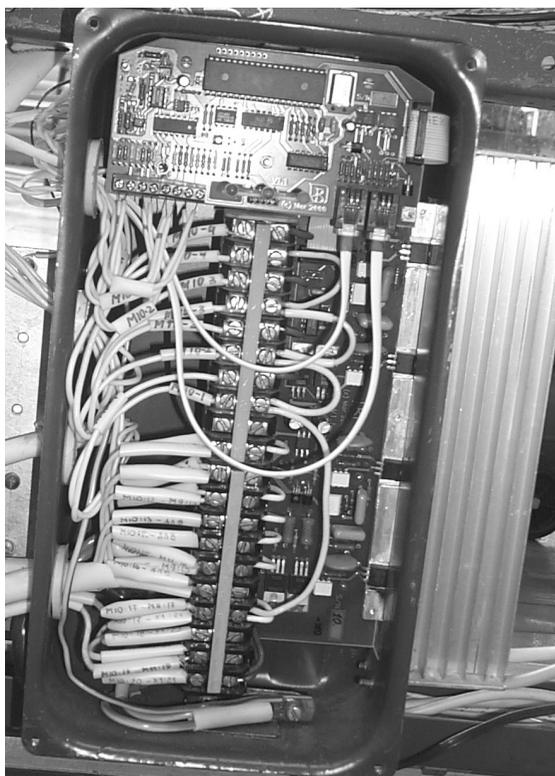


Рис. 7. Вид модуля управления. Плата АЦП размещена сверху, плата симисторов – справа и ниже от клеммника. Левая часть клеммника предназначена для электротехнического монтажа.

Работа первой платы, платы АЦП, состоит в следующем. Напряжения с четырёх термопар, подключенных к отдельному термопарному клеммнику, коммутируются с помощью аналогового коммутатора (МХ), а затем усиливаются дифференциальным усилителем (К), коэффициент которого программируется резистором и для разных систем принимал значения от 50 до 200. Выходное напряжение усилителя сдвигается на +372 мВ, чтобы обеспечить измерение температур меньших, чем температура холодного спая, и далее преобразуется в цифровой код с помощью 2-х канального 10-битового АЦП MAX157.

На второй вход АЦП MAX157 подано напряжение с датчика холодного спая. Конструкция термопарного клеммника такова, что датчик холодного спая измеряет температуру непосредственно холодных концов термопар. Разрешающая способность датчика холодного спая 0,4°, абсолютная ошибка ±1°.

В качестве примера можно привести характеристики системы для управления линией пайки Bus Bars. В системе использовались хромель-копелевые термопары, коэффициент усилителя – 170, диапазон сигналов по термопарному входу равен $-2.2 \div +21.9$ мВ, или примерно $-10^\circ \div +310^\circ$ при разрешающей способности 0.4° .

Работой АЦП управляет CPU, реализованный на микропроцессоре AT89C51. Также в функции CPU входит поддержка связи с управляющей ЭВМ по последовательной линии связи, включение/выключение симисторов и контроль исправности нагревателей и симисторов.

Четыре мощных симистора, управляющие четырьмя независимыми нагревателями, расположены на второй плате, соединённой с первой плоским 16-проводным шлейфом. Команды от CPU через шлейф поступают на промежуточные маломощные симисторы с оптическим управлением и включением при переходе фазы напряжения через ноль (MOC3082-optoisolated zero-crossing triac driver). Эти маломощные симисторы в свою очередь включают мощные симисторы с током коммутации до 10 А и напряжением до 600В. Радиатор, на котором установлены мощные симисторы, позволяет рассеивать мощность до 50 Вт при естественном охлаждении. Мощность на нагрузке может достигать 2.5 кВт/канал.

В процессе регулирования ось времени разбивается на интервалы длительностью 64 периода сети. В зависимости от требуемой мощности в течение одного интервала (1.3сек) нагреватель может быть включен на любое количество периодов сети: от 0 до 63. Соответственно, мощность может регулироваться с дискретностью $1/64$ от 0 до $0.985 \cdot P_{max}$.

Такой способ регулирования обладает заметными преимуществами перед широко распространённым фазо-импульсным методом регулирования мощности на нагревателях с помощью тиристоров. Во-первых, наименее надёжный элемент всех систем – нагреватель – включается в “мягком” режиме, когда ток нарастает из нуля за время 5мсек, а не мгновенно. Это заметно увеличивает долговечность нагревателя. Приведем такой факт: обычная осветительная лампа, включенная параллельно нагревателю в целях контроля, за время работы системы по отжигу ниобий-оловянных катушек выдержала более $9 \cdot 10^5$ включений\выключений. Во-вторых, подача напряжения на нагрузку при близкой к нулю фазе, устраняя скачок тока, делает малым уровень помех коммутации. Как следствие, повышается надёжность цифровых узлов систем.

На второй плате размещены также схемы, контролирующие исправность симисторов и наличие нагрузки. Схема включена параллельно нагрузке и состоит из сопротивления и последовательно включенного светодиода оптопары. Выход оптопары опрашивается с помощью CPU. Симистор неисправен, либо отсутствует нагрузка, если команда на включение симистора выдана, и ток через светодиод не течёт, или команда не выдана и

ток течёт. При выявлении неприятностей CPU взводит соответствующий бит в статусной информации.

Конструктивно модуль управления размещён в стандартной электротехнической коробке КМ43-20УЗР43 с доработанной боковой стенкой для установки платы симисторов с радиатором (Рис. 7). Весь электротехнический монтаж (подключение питания и нагревателей) выполняется на левой половине стандартного клеммника, плата симисторов подключается к правой половине того же клеммника.

Программное обеспечение

Важным элементом автоматизированной системы управления технологическим оборудованием является программное обеспечение. К нему предъявляются следующие требования.

- Программа должна выдерживать определенный температурный график.
- Программа должна представлять данные о текущих температурных полях и создавать файл-журнал.
- Она должна уметь отслеживать состояние аппаратных средств системы управления, технологической линии и при возникновении неприятностей выполнять необходимые аварийные действия.
- Пользовательский интерфейс программы должен быть как можно более простым. При этом необходимо, чтобы программа представляла данные о состоянии системы в простейшей для восприятия форме и предоставляла минимально необходимый набор возможностей для изменения состояния системы. Также желательно, чтобы она указывала возможные варианты дальнейших действий оператора.
- Должна существовать возможность гибкого изменения режимов нагрева и переконфигурирования линии квалифицированным персоналом.
- Структура программного обеспечения должна позволять легко модифицировать его под различные задачи, связанные с термической обработкой изделий.

К настоящему времени созданы следующие программы:

TCS 1.1 – управление линией пайки Bus Bar; активно использовалась на этапе отладки технологии пайки; предоставляет широкие возможности по оперативному изменению режимов и визуализации температурных процессов.

TCS 2 – модифицированная и упрощенная версия TCS 1.1; используется в настоящее время для серийного производства.

TCS 1.2 – работа с линиями полимеризации изоляции Bus Bar.

TCS 3.1 – программа для вакуумного отжига сверхпроводящих соленоидов.

TCS 3.2 – управление печью для сушки аэрогеля.

Termo16 – программа управления промышленной печью для изготовления шихтованных магнитных элементов методом спекания.

Все существующие версии программного обеспечения имеют общую структуру, однако существуют некоторые отличия, которые будут описаны позднее.

Общая структура программ, управляющих технологическим оборудованием, выглядит следующим образом (Рис.8).

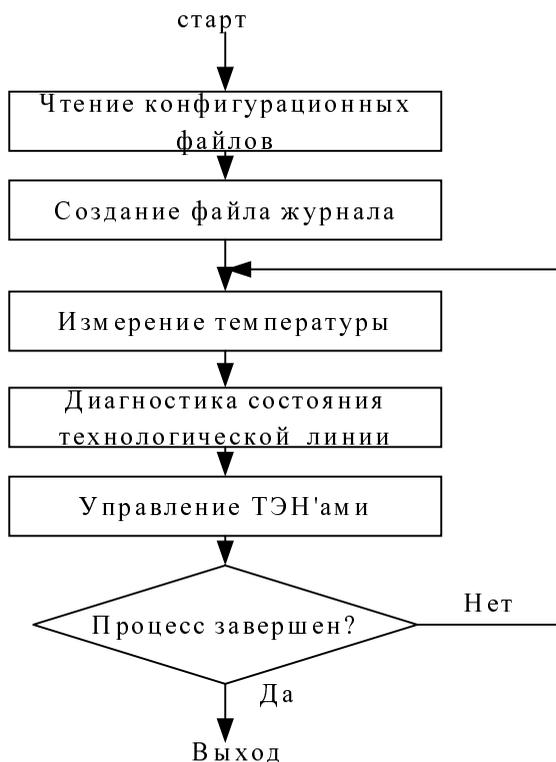


Рис. 8. Общая структура управляющей программы.

При запуске программа должна получить информацию об оборудовании, которым она будет управлять, и графике нагрева. Эту информацию можно считывать из внешних файлов, которые описывают конфигурацию строго определенным образом. Другой способ получить информацию о том, чем программа будет управлять и как это делать - указать это в коде самой программы. Однако второй способ мало приемлем, так как при любом изменении (графика нагрева или конфигурации оборудования) необходимо

исправлять код программы, что подразумевает высокую квалификацию оператора, а также может привести к появлению ошибок.

После интерпретации конфигурационных файлов программа попросит оператора указать имя файла, где будут сохраняться данные о процессе термической обработки. Программа создает файл-журнал, куда будут заноситься результаты измерения температур, а также дополнительная информация о текущем рабочем цикле (например, сообщения о возникших во время работы ошибках). Эта информация может понадобится для последующего анализа технологического процесса.

Далее программа входит в рабочий цикл, состоящий из двух элементов: регулирования температуры и анализа состояния (исправно/неисправно) оборудования.

Рассмотрим каждый из этих этапов подробнее.

Как говорилось выше, информация о структуре технологического оборудования сообщается программе через конфигурационные файлы. Для этого был разработан специальный язык, при помощи которого можно описать все элементы системы управления и требуемый график нагрева. Конфигурационные файлы, как правило, состоят из двух частей. Первая из них – секция конфигурации технологического оборудования. Она содержит описание:

1. модулей управления – `box(name,port,addr,prop)`. Каждый из модулей управления описывается собственным именем, именем порта в компьютере, к которому подключена линия связи, и уникальным адресом микропроцессорной платы модуля управления. Кроме того, здесь указываются некоторые свойства модуля управления: наличие в нем датчика температуры холодного спая и внутренние адреса термодпар и ТЭН'ов.
2. термодпар – `tp(name,box,addr)`. Здесь указываются имя термодпары, модуль управления, к которому она подключена и ее адрес внутри модуля управления.
3. ТЭН'ов – `ht(name,box,addr[,power_limit])`. Описание аналогично описанию термодпар, за исключением одного необязательного параметра, который может принимать значения в диапазоне от 0 до 1. Он указывает, какую часть от номинальной мощности можно подавать на этот нагревательный элемент. По умолчанию этот параметр равен 1.
4. каналов управления – `control(name,tp_name,ht_name,tune_range)`. Каждый из каналов управления ставит в соответствие термодпаре нагревательный элемент, температуру на котором она контролирует. Последний параметр в описании канала управления – это диапазон плавной регулировки температуры.

Во второй секции конфигурационных файлов описывается график нагрева. Он разбивается на отдельные этапы, внутри которых температура изменяется по линейному закону. Вследствие этого каждый из этапов

характеризуется двумя параметрами: длительностью этапа в часах t_i и конечными температурами T_{ki} , которые должны быть достигнуты по каждому из каналов управления к концу этапа i .

После интерпретации конфигурационных файлов создаётся файл-журнал и далее программа начинает управлять технологическим оборудованием. Вначале она производит первое измерение температуры. Это измерение выделено среди всех остальных, потому что по его результатам определяется требуемая скорость изменения температуры на первом этапе графика.

Принцип регулировки температуры в канале управления состоит в том, чтобы по разнице между измеренной температурой и её теоретическим графиком определить мощность, которую следует подавать на нагревательный элемент.

Теоретический график температуры на этапе i определяется по следующей формуле:

$$T(t) = \frac{T_{ki} - T_{0i}}{t_i} \cdot t,$$

где T_{ki} – конечная температура для данного этапа, t – время, прошедшее с начала текущего этапа, t_i – полная его длительность, T_{0i} – температура данного канала управления в начале этапа.

Переход на следующий этап графика нагрева возможен только после того, как температуры, измеренные по всем каналам управления, превысят или станут равными конечным температурам. Из формулы видно, что это произойдет не ранее чем через t_i часов или минут (в зависимости от версии программы) с момента начала этапа. В случае, когда по какой-либо причине какой-нибудь нагревательный элемент не сможет нагревать соответствующую ему зону нагрева с требуемой скоростью, данный этап будет автоматически продлен на необходимое время.

По завершении последнего этапа графика нагрева программа выключает нагрев линии и завершает свою работу.

Мощность, которую следует подавать на ТЭН'ы, определяется в соответствии с правилом:

$$P = 1 \quad (T_x - T(t)) < 0$$

$$P = \frac{T_x - T(t)}{T_{nl}} \quad 0 \leq (T_x - T(t)) \leq T_{nl}$$

$$P = 0 \quad (T_x - T(t)) > 0$$

Графическая иллюстрация этого правила показана на рисунке 9.

Диапазон линейной регулировки температуры указывается при описании каналов управления в конфигурационных файлах. Его величина определяет

коэффициент передачи по петле обратной связи в зоне линейного регулирования. Такой способ во многих случаях позволяет устранить колебательность в поведении температур, не прибегая к более сложным законам регулирования. В каждой из задач диапазон линейной регулировки определялся экспериментально, исходя из требуемой точности регулирования и инерционности температурных процессов.

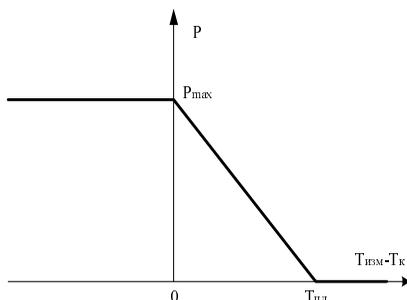


Рис. 9. Регулирование мощности в зависимости от разницы измеренной и конечной температур.

Ещё одним элементом рабочего цикла является проверка наличия/исправности нагревателей, исправности симисторов и термопар. Диагностика элементов проводится в самом начале цикла, перед измерением температуры в каналах управления, так как во время диагностики ТЭН'ы переключаются в различные состояния и последнее из них может не совпадать с тем, которого требует разность температур.

Неисправности термопары определяются только в том случае, если они возникли внезапно, когда процесс уже был запущен. При этом, и в случае обрыва, и в случае замыкания измеренная температура изменится скачком. И если отслеживать температурный график в течение нескольких измерений, то не сложно будет заметить скачкообразное изменение измеренной температуры.

При обнаружении каких-либо неисправностей, программа выводит соответствующее сообщение на экран и предоставляет оператору самому решить, что следует предпринять.

Интерфейс оператора и примеры работы

Перечисленные выше программы имеют одинаковую структуру. Их главные отличия заключаются в пользовательском интерфейсе. Поэтому имеет смысл рассмотреть каждую из версий отдельно.

TCS 1.1 и TCS 1.2

Как уже говорилось ранее, данные версии программы были разработаны для управления технологическим оборудованием, на котором производится

пайка и полимеризация изоляции сверхпроводящих шин. Кроме того, с помощью TCS 1.1 производилась отладка технологии термической обработки шин. В силу этого, программа имела ряд дополнительных возможностей, которые отличают ее от остальных версий.

Во-первых, в конфигурационных файлах возможно описание пользовательских меню. С их помощью оператор может произвольным образом изменять параметры этапов графика нагрева и порядок их выполнения, а также величину временного интервала между измерениями температуры. Во-вторых, на экран выводились результаты измерений температуры по всем каналам управления в графическом и текстовом виде. Число каналов управления для линии пайки составляет 44, а для линии полимеризации 42. Без серьезного опыта работы с данными программами очень сложно установить соответствие между каналами управления и графиками на дисплее компьютера. Повторим, однако, что подобный подход был вызван необходимостью отладки технологии, требовавшей предоставления оператору полной информации.

В отличие от линии пайки, где обрабатывается одна шина, линия полимеризации состоит из трех отдельных пресс-форм, которые могут быть включены одновременно. Каждая из них предназначена для полимеризации изоляции шин разных типов. Кроме того, процесс полимеризации более длительный (6 часов), чем пайка (45 минут). В силу этих причин вывод результатов измерений температур по всем каналам является нежелательным.

Упростить вывод результатов измерения температур можно двумя способами. Первый способ заключается в том, чтобы разделить весь экран на три части (окна) и выводить температурный график для каждой из шин в своем окне. Этот способ неудобен тем, что размеры каждого из окон будут невелики. Они составят 640x160 точек, если разбивать экран по вертикали, или 210x480 точек, в случае горизонтального разбиения. В них придется разместить 6 часов по оси времени (горизонтали) и 170°C по оси температуры (вертикали). Очевидно, что рассматривать такой рисунок будет очень неудобно.

Второй способ графического отображения измерений температур состоит в том, чтобы выводить наиболее существенные результаты измерения температур. Этому способствует тот факт, что при отлаженной технологии температура вдоль шины различается на 1 – 2 градуса. Поэтому для того, чтобы получить необходимую информацию о температуре линии, достаточно знать ее максимальную и минимальную температуры. Для вывода результатов измерения температур на линии полимеризации был выбран именно этот способ: на экран выводилась максимальная и минимальная температура своим цветом для каждой из трех линий (Рис. 10).

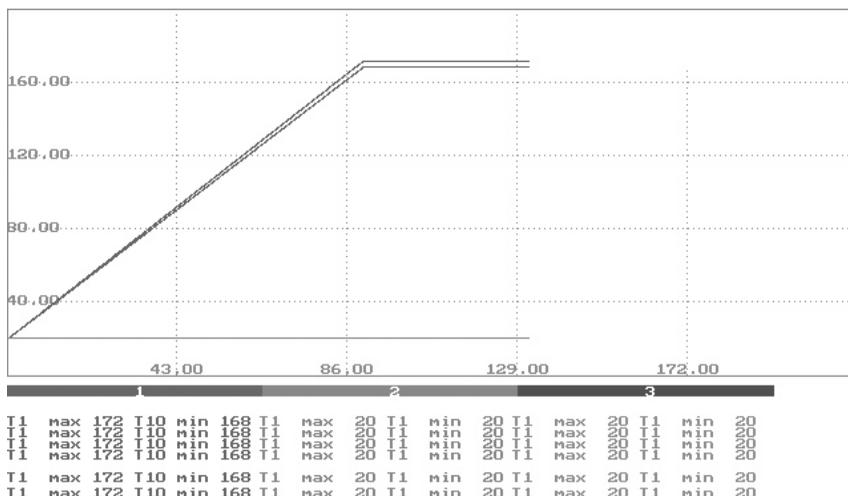


Рис. 10. Температурный график при работе одной из пресс форм линии полимеризации. Отображаются максимальная и минимальная температуры. Две другие пресс-формы выключены.

TCS 2.0 (TCS Monitor)

Версии 1.0 и 1.1 программ эксплуатировались в течение одного года. Программа, управляющая линией полимеризации, не потребовала каких-либо доработок и была признана удовлетворяющей условиям серийного промышленного производства. В то же время в программе для линии пайки были выявлены следующие просчёты:

- отсутствовал мониторинг технического состояния линии в интервалах между пайкой шин, который составляет 10-15 минут. За это время производится замена обрабатываемых изделий, а также загрузка припой в тигли. Если во время этого интервала выходит из строя любой из управляющих тиристоров, то это приводит к неконтролируемому нагреву соответствующего участка технологической установки. Обнаружить эту неисправность можно было лишь при запуске нового рабочего цикла. Кроме того, во время паузы в работе программы припой в тиглях застывает и потом требуется время, чтобы его снова расплавить.
- на экран выводились результаты измерений температуры по всем каналам управления (всего задействовано 44 канала управления) и разобаться в том, какой из графиков на экране компьютера относится к какому из каналов управления, было достаточно сложной задачей.

В программу TCS 1.0 были внесены изменения, и новая версия получила название TCS 2.0. Программа работает непрерывно в течение смены. Она

постоянно проверяет состояние технологического оборудования и проводит измерения температуры по всем каналам управления. Таким образом, все неполадки оборудования, в том числе и термодатчики, выявляются своевременно.

Во время исполнения программа может находиться в трех состояниях. Для каждого из них определен набор действий, которые ей требуется выполнять. Переходы из одного состояния в другое строго регламентированы. Все они производятся оператором по достижению определенных условий.

При запуске программа находится в первом состоянии. В нем она производит только измерения температуры по всем каналам управления и контроль неисправностей технологического оборудования. Во второе состояние программу может переключить оператор, выбрав соответствующий пункт в меню. В нем, кроме функций первого состояния, программа производит нагрев тиглей с припоем.

Включить нагрев всей линии оператор сможет только после того, как припой в тиглях будет расплавлен. Определить, когда это произойдет, можно, анализируя изменения температуры в тиглях. Экспериментальным образом, было установлено, что когда температура тиглей достигает 245°C, весь припой (температура его плавления 228°C), вне зависимости от его массы, уже находится в расплавленном состоянии. Достижение этой температуры и интерпретируется программой, как окончание процесса плавления припоя. Все остальное время в тиглях поддерживаются 235°C. Если температура тиглей падает ниже 225°C, это интерпретируется как застывание припоя, и программа снова запрещает включение нагрева всей линии.

И последнее изменение программы TCS 1.0 касалось визуализации данных. При хорошо отлаженной технологии нет необходимости знать температуру всех каналов управления, так как отличие в температурах вдоль 12-метровой линейной части не должно превышать $\pm 2^\circ$. Достаточно наблюдать распределение температурных полей на краях шины и знать максимальную и минимальную температуры её линейной части. Таким способом было сокращено число графиков, выводимых на экран.

На рисунке 11 показано диалоговое окно программы TCS 2.0.

TCS 3.1

Программа TCS 3.1 управляет вакуумной печью для отжига сверхпроводящих катушек из ниобий-олова. В системе задействованы один канал управления по температуре и канал управления по вакууму (для чего изменена чувствительность одного из термодатчиков входов стандартного модуля управления). Ещё два канала измеряют температуры на катушке, но в управлении не задействованы.

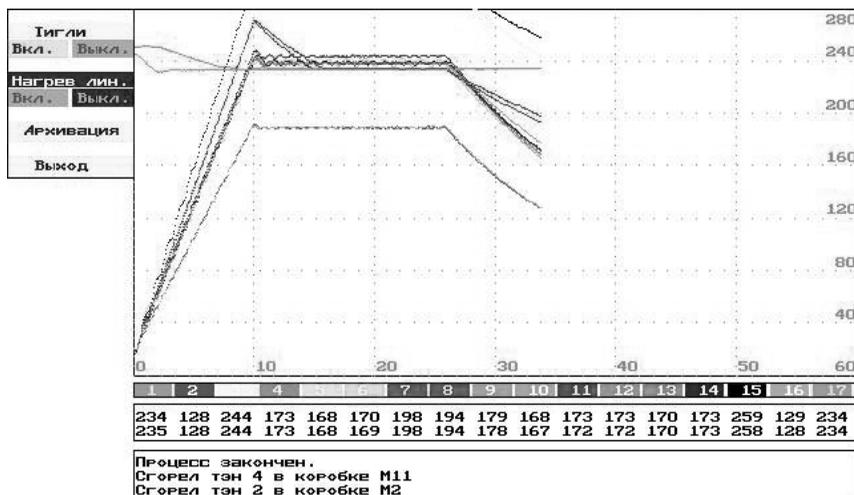


Рис. 11. Диалоговое окно программы TCS 2.0.

Процесс отжига длится более восьми суток, а стоимость катушки составляет более 60000 руб., что накладывает серьезные требования к надежности системы управления. Более подробно вопросы надежности будут рассмотрены в следующем разделе, а здесь отметим лишь один момент. Ввиду того, что отжиг проводится при температуре 700°, наиболее вероятные причины неисправностей: перегорание нагревателя, обрыв или замыкание термопары, выход из строя управляющего тиристора. Если первая неисправность приводит к полной остановке, то вторая и третья могут быть устранены оперативным образом и не вызовут прекращение рабочего цикла.

Как уже говорилось ранее, поломку термопары легко обнаружить по скачкообразному изменению измеряемой температуры. Если это происходит, программа передает управление другому, резервному термопарному каналу (напомним, что в данной системе из четырех измерительных каналов стандартного модуля управления используются только два, а еще два являются резервными).

К сожалению, выход из строя тиристора требует вмешательства персонала и кратковременной (5-10мин.) остановки работы для переключения выводов нагревателя. Отсюда следует, что программа должна уметь возобновлять работу с того момента, когда она была остановлена. Для того чтобы определить этап графика нагрева, во время которого была произведена остановка, используется файл-журнал. Проанализировав последнюю запись и зная график нагрева несложно определить действия,

которые требуется выполнять (нагревать линию, поддерживать температуру или контролировать остывание).

Кроме того, программа должна своевременно информировать оператора о возникших проблемах, для чего необходим дистанционный мониторинг (вследствие большой длительности процесса нет постоянного оператора на технологическом участке).

Задачу дистанционного мониторинга оборудования можно решить двумя способами. Первый из них состоит в том, чтобы встроить в существующее программное обеспечение сетевой драйвер. Другой – в том, чтобы заменить управляющую операционную систему MS DOS. Было решено перейти на ОС семейства Linux, так как Linux, по сравнению с MS Windows, требует значительно меньших аппаратных ресурсов и позволяет при реализации дистанционного мониторинга обойтись лишь системными возможностями. Такой подход сводит к минимуму вмешательство в уже существующее программное обеспечение (требуется лишь сменить функции ввода/вывода), и не добавлять сетевые интерфейсы, как это потребовала бы ОС MS Windows.

В качестве иллюстрации на рисунке 12 показан график отжига сверхпроводящей катушки для с полем 9Т для контракта “Superbend” (Bessy-II, Germany).

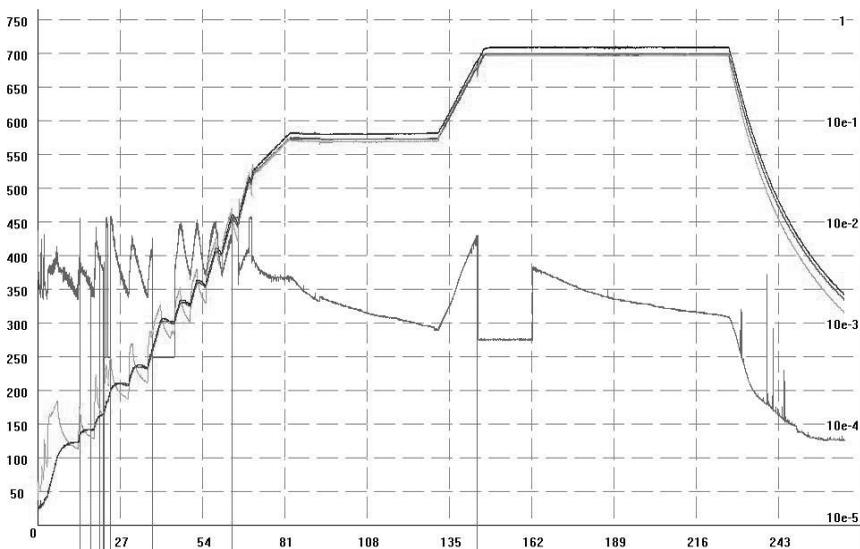


Рис. 12. Поведение температуры и вакуума при отжиге 9Т - сверхпроводящей катушки. Нагрев отключался при ухудшении вакуума до 10^{-2} Па. Температурный график серого цвета – температура незакрепленной на массе термонары. Пики вниз на графике вакуума – отключение вакуумметра оператором.

TCS 3.2

Данная программа используется для отжига аэрогеля. Она является упрощенной версией программы TCS 3.1.

Вопросы надёжности

Нормальное безаварийное функционирование установок для термической обработки, выделяющих значительную энергию и работающих длительное время в условиях производства, требует специальных мер по предотвращению аварий и брака.

Как отмечалось выше, наименее надёжными элементами всех систем являются ТЭН'ы, их контакты и мощные симисторы. Напомним, что для обнаружения неисправностей этих элементов в каждом канале модуля управления есть оптопары, с помощью которых программа следит за наличием/отсутствием ТЭН'а и исправностью симистора.

Термопарные датчики при правильном изготовлении и монтаже являются вполне надёжными. Однако в случае съёмных нагревателей при неаккуратном обращении они могут быть повреждены. В настоящее время неисправности термопары могут быть обнаружены только по скачкообразному изменению температуры во время работы программы. В следующих версиях модулей управления будут использованы аппаратные решения, которые позволят следить за состоянием термопар.

Нельзя признать вполне надёжными управляющие компьютеры, так как во всех системах использованы IBM PC в обычном офисном исполнении. Если от сбоев компьютера вследствие неприятностей в питающей сети можно защититься с помощью источников бесперебойного питания, то от воздействия вредных факторов промышленного цеха (пыль, перепады температуры, вибрация), приводящих к ненадёжной работе компьютера, защититься весьма сложно. В этой связи в случае внезапной остановки компьютера было решено отключать ТЭН'ы. Для реализации этого одной из функций CPU в модуле управления является функция "Watch Dog". Если компьютер не обращался к модулю более 15 секунд, то CPU считает, что произошёл сбой управляющей РС и отключает ТЭН'ы.

Эта же функция позволяет обнаружить повреждение линии связи.

Заключение

Разработаны аппаратные и программные средства автоматизации технологического оборудования для термической обработки элементов физических установок. На основе разработанных средств созданы системы управления шестью технологическими установками. Три из них успешно эксплуатируются уже более трёх лет в Экспериментальном производстве ИЯФ.

А.М. Батраков, Б.Р.Карымов, Д.С.Шичков

**Автоматизация технологического оборудования
для термической обработки узлов физических установок**

A. Batrakov, B. Karymov, D. Shichkov

**Computer based control of heat treatment manufactory equipment
for physical devices production**

ИЯФ 2003-55

Ответственный за выпуск А.М. Кудрявцев
Работа поступила 28.08. 2003 г.

Сдано в набор 29.08. 2003 г.
Подписано в печать 1.09.2003 г.
Формат 60х90 1/16 Объем 1.5 печ.л., 1.2 уч.-изд.л.
Тираж 90 экз. Бесплатно. Заказ № 55

Обработано на IBM PC и отпечатано
на ротапринтере ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН,
Новосибирск., 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11