



Контроль процесса термообработки изделия по циклу «разогрев-выдержка-охлаждение» многофункциональным ПИД-регулятором

Алексей Костерин

В статье описываются особенности управления температурно-временными режимами при термообработке изделий по алгоритму «разогрев-выдержка-охлаждение» с помощью многофункционального ПИД-регулятора МЕТАКОН-6305 производства НПФ КонтрАвт.

Постановка задачи

Среди огромного множества технологических процессов термической обработки материалов (изделий) можно выделить два, которые особенно распространены. Это процесс термической выдержки материала (изделия) при определённой температуре заданное время, а также его разновидность – процесс разогрева, выдержки и охлаждения изделия вместе с термическим оборудованием.

Графики температуры, характерные для этих двух процессов, показаны на рис. 1 и 2. Термообработка в соответствии с графиком на рис. 1 часто встречается при термообработке металлических изделий в шахтных и камерных печах, при сушке материалов в камерах сушки, при обработке порошковых покрытий в камерах полимеризации, в прессах резинотехнических изделий и т.п. Ярким примером процесса по графику на рис. 2 может служить процесс термообработки металлов в вакуумных печах.

Своеобразие ситуации заключается в том, что, несмотря на очевидные особенности этих процессов, в большинстве случаев как старое, так часто и современное электротермическое оборудо-

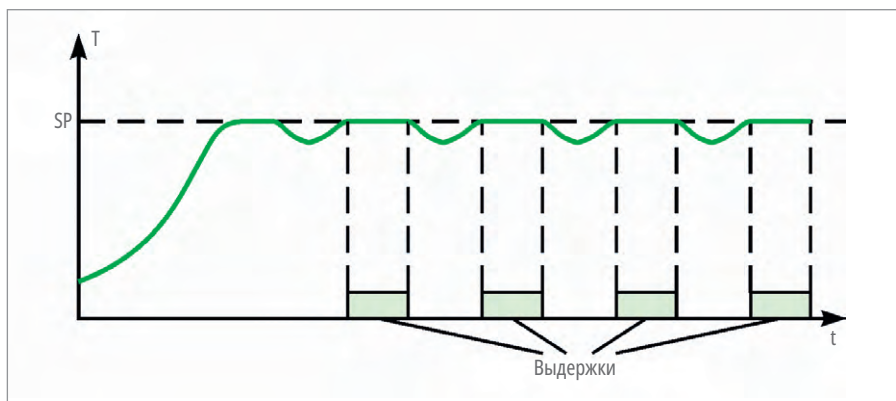


Рис. 1. График температуры непрерывного процесса при многократной загрузке

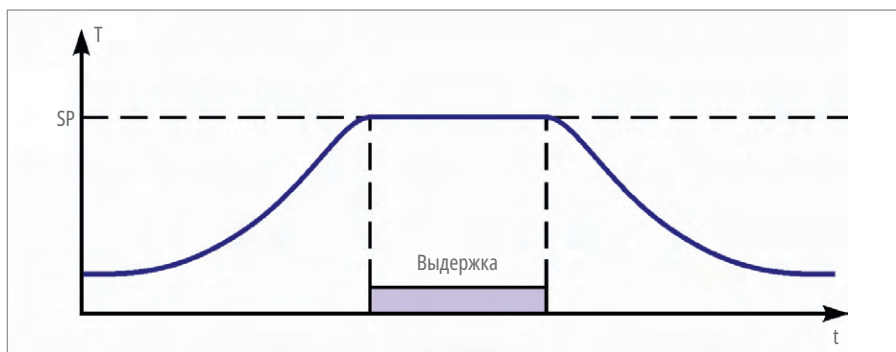


Рис. 2. График температуры конечного процесса при однократной загрузке

дование содержит в своём составе системы управления, которые не учитывают эти особенности.

Рассмотрим типичную камерную печь, предназначенную для термической обработки металлических изде-

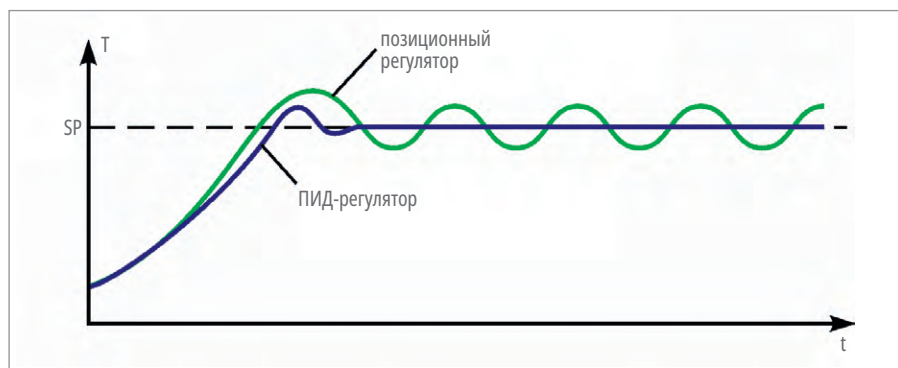


Рис. 3. График температуры позиционного и ПИД-регулятора при непрерывном управлении

лий. Система управления построена на регуляторе температуры, который обеспечивает непрерывное поддержание температуры (будем далее называть его «обычным регулятором»).

Графики температуры в отсутствие загрузок изделий при использовании позиционного и ПИД-регуляторов показаны на рис. 3. Как видим, графики после выхода на режим после разогрева представляют ровную линию (для позиционного регулятора наблюдаются колебания температуры), и регуляторы, казалось бы, выполняют свою задачу идеально. Видимо, исходя из этих соображений, производители печей и применяют подобные регуляторы.

Однако посмотрим, как реально должен протекать процесс термической обработки в такой печи (рис. 4). На графике можно выделить ряд характерных этапов, на каждом из которых от

регулятора требуется наличие специфических функций.

Этап 1. Предварительный разогрев печи и выход на режим в отсутствие садки (изделий).

В принципе, с этим прекрасно справляется «обычный регулятор», за исключением одной особенности. Дело в том, что процесс разогрева промышленной печи, как правило, весьма долгий и может составлять несколько часов. Если печь включается в начале смены, то это время можно считать потерянным. Очевидно, нужен контроллер температуры, выполняющий функции таймера предварительного пуска, который позволил бы запускать процесс нагрева в нужное время до начала смены. На рис. 1 показан этап работы таймера пуска.

Этап 2. Дверь открыта, осуществляется загрузка печи.

На этом этапе открывается дверь печи, что и предопределяет ряд особенностей данного этапа. Очевидно, открытие двери печи охлаждает рабочее пространство, и температура печи перестает соответствовать заданному температурному режиму обработки изделия.

Вторая особенность связана с поведением регулятора в охлажденной печи. Охлаждение датчика температуры приведет к тому, что «обычный регулятор» температуры (даже если применяется ПИД-алгоритм) установит максимальную мощность нагревателей, что приведет к их перегреву. Это, в свою очередь, может привести и к недопустимому перегреву в объеме печи после закрытия дверцы. Было бы более правильным на время открытия дверцы фиксировать мощность нагрева на уровне, который был до открытия двери. Ещё более правильным было бы поддерживать мощность на несколько более высоком уровне (но не максимальном), чтобы частично компенсировать охлаждение печи. В этом случае после закрытия двери печь выходила бы на заданный уровень максимально быстро, но при этом без перегрева (как в случае «обычного регулятора»).

Однако могут быть и другие требования к управлению мощностью нагревателей во время открытия двери. В ряде случаев нагреватели выполняют в виде открытых спиралей. Тогда из соображений безопасности требуется нагреватели обесточивать.

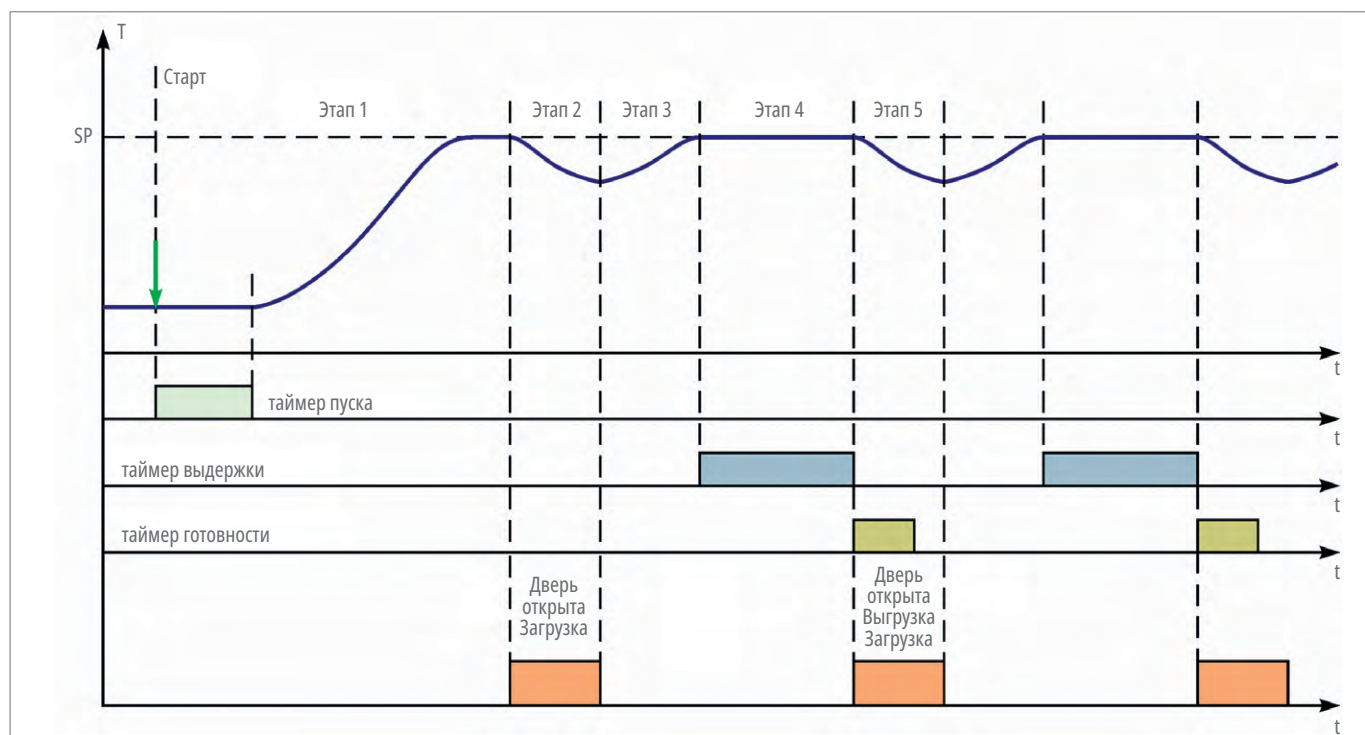


Рис. 4. Основные этапы непрерывного процесса с многократной загрузкой

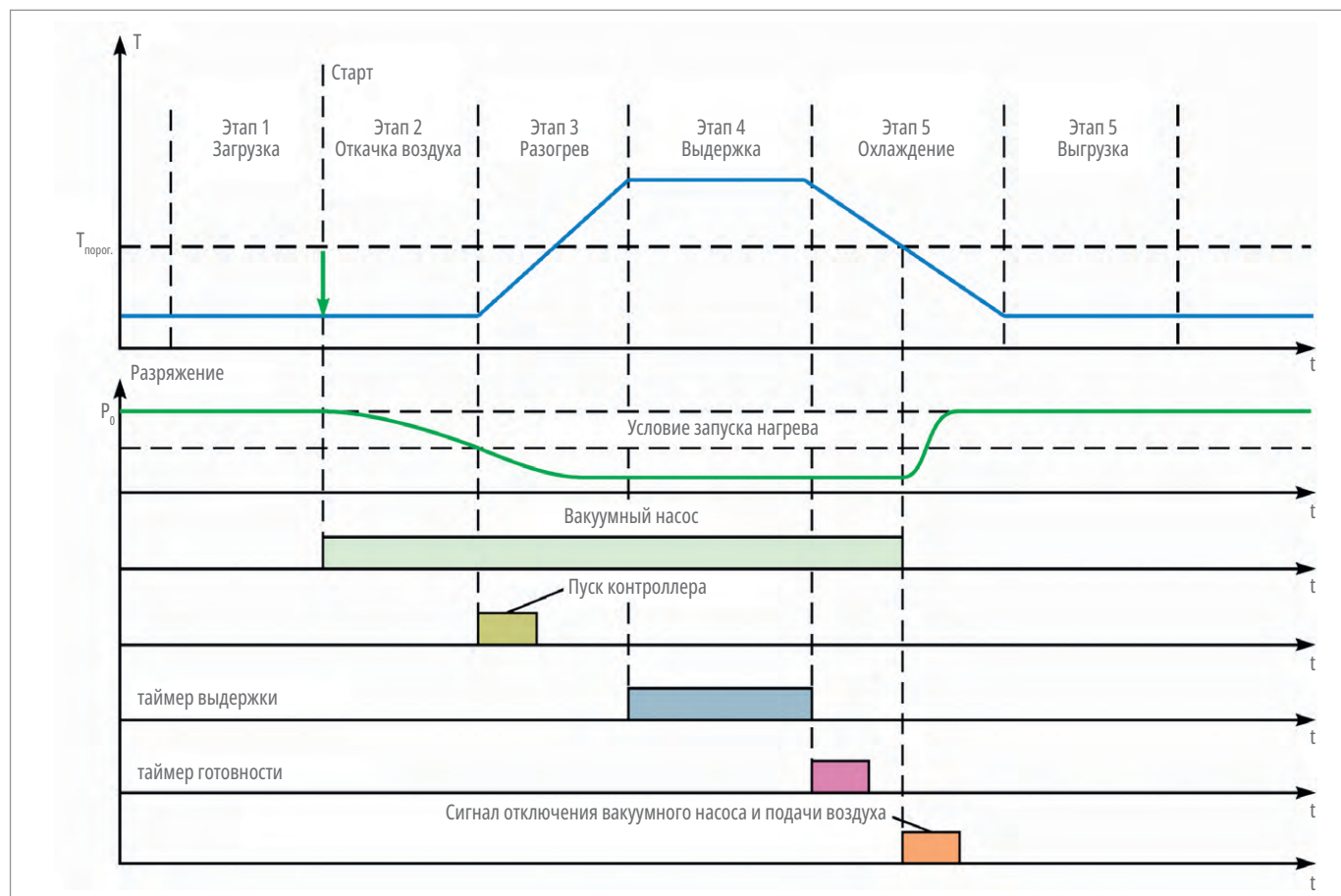


Рис. 5. Основные этапы конечного процесса с однократной загрузкой

Итак, требуется контроллер температуры, который особенным образом управляет бы мощностью нагревателей при открытой двери. Поскольку эти особенности управления мощностью привязаны к открытию двери, то контроллер должен считывать факт открытия двери с помощью соответствующего сигнала, например, контактного выключателя, прикрепленного к двери. «Обычный регулятор», как правило, даже не содержит таких входов управления.

Этап 3. Дверь закрыта, выход на температурный режим.

Несмотря на то что изделие находится в печи, ещё нельзя считать, что оно подвергается термообработке в нужном режиме. Отсчёт времени следует начинать только с того момента времени, когда температура выйдет на заданный уровень, точнее, войдёт в заданный технологический коридор. В случае «обычного регулятора» фиксировать этот момент предоставляется термисту. Появление «человеческого фактора» сразу создаёт угрозу качественному отсчёту времени процесса. Кроме того, чтобы отследить этот момент, термист должен находиться около «обычного регулятора» в режиме ожидания, что резко снижает эффек-

тивность использования персонала, особенно, если таких печей много.

Конечно, необходим контроллер, который самостоятельно, без участия термиста, фиксировал бы нужный момент и запускал таймер выдержки.

Как уже отмечалось при описании этапа 3, именно в момент выхода на заданную температуру может произойти нежелательный выброс температуры, который обусловлен перегревом нагревателей при открытой двери и перерегулированием. Перегрев устраняется особым алгоритмом управления мощностью на этапе 2 при открытой двери.

Этап 4. Это непосредственно этап термической обработки изделия в течение заданного времени выдержки.

На этом этапе в случае «обычного регулятора» на термиста возлагается функция таймера. Он должен всё время следить за временем и в нужный момент произвести выгрузку изделия. Надо учитывать, что при нормальной организации работ термист обслуживает много печей и в нужный момент может быть занят другими делами и просто пропустить момент окончания термообработки. А представьте себе, как он должен выполнять одновременно функции 5–10 таймеров, запущенных в

разное время и отсчитывающих разные временные интервалы. Ситуация может осложняться ещё и тем, что термообработка может занимать значительное время и захватывать разные смены. В этом случае функции таймера передаются вместе с передачей смены другим термистам. Какова же при этом вероятность ошибки? Всё это области влияния пресловутого «человеческого фактора» на качество технологического процесса.

Конечно же, отсчёт времени должен взять на себя контроллер, а для того, чтобы термист не пропустил выгрузку изделия, контроллер должен подать сигнал готовности. В данном примере автоматика не позволяет полностью заменить действия термиста по автоматической выгрузке изделий из-за отсутствия средств выгрузки, но помогает действовать безошибочно и избавляет его от ненужных и непроизводительных усилий по контролю за временем выдержки.

Этап 5. Открытие двери, выгрузка изделия и загрузка следующего. С этого этапа цикл термообработки изделий повторяется.

Описанный процесс термообработки можно назвать непрерывным с много-



СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

 **33 ГОДА**
на рынке

**НОРМИРУЮЩИЕ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ**

СЕРИИ НПСИ



Класс точности 0.1



**БАРЬЕРЫ
ИСКРОЗАЩИТЫ**

СЕРИИ КА5000Ex



В реестре Минпромторга



отгрузка сразу со склада • бесплатная опытная эксплуатация
межповерочный интервал – 5 лет • гарантия на продукцию – 3 года



www.contravt.ru
+7 (831) 260-13-08
sales@contravt.ru

**ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЕ ИЗ
НИЖНЕГО НОВГОРОДА**



кратной циклической загрузкой. В отличие от него, назовём процесс, показанный на рис. 5, конечным с однократной загрузкой. Есть целый ряд процессов, когда изделие загружается в охлаждённую печь, и весь цикл разогрева, термообработки, а затем и охлаждения изделие проходит вместе с печью. Ярким примером здесь может служить обработка титана в вакуумной печи с последующим охлаждением. В этом случае производится загрузка изделия в охлаждённую печь, затем осуществляется откачка воздуха, нагрев, выдержка и последующее охлаждение до определённого уровня, только после этого можно снять вакуум и открыть дверь. Указанные особенности процесса обусловлены тем, что титан не допускает нагрев в воздушной среде. Поэтому перед нагревом сначала создаётся вакуум, а на стадии охлаждения – сначала должно произойти охлаждение, а затем снимается вакуум. Для ускорения процесса охлаждения в вакуумную печь запускают азот, который забирает на себя тепло изделия, увеличивая теплопередачу. В вакууме охлаждение происходит медленно, поскольку теплоотдача происходит в основном только за счёт излучения.

Рассмотрим основные этапы термообработки в этом случае.

Этап 1. Дверь открыта, загрузка изделия в охлаждённую печь.

На этом этапе необходимо только обеспечить отсутствие нагрева.

Этап 2. Дверь закрыта, откачка воздуха до требуемого уровня вакуума.

Запускается вакуумный насос, который обычно работает непрерывно в течение всего цикла. Его задача поддерживать уровень разрежения на уровне, не ниже допустимого. Для контроля вакуума применяются соответствующие измерители с сигнализацией. При достижении заданного уровня вакуума срабатывает компаратор и запускает контроллер температуры.

Этап 3. Стадия разогрева.

Как правило, техпроцесс предписывает разогрев с заданной контролируемой скоростью. Нагрев должен происходить настолько медленно, чтобы изделие успевало равномерно прогреться. Во-первых, это исключит коробление, а во-вторых, это обеспечит равномерную термообработку при заданной температуре по всему объёму изделия. Очевидно, при быстром разогреве внутренние части изделия достигнут требуемой температуры с задержкой, а следовательно, будут под-

вергаться термообработке недостаточно долго.

Этап 4. Стадия выдержки (собственно термообработка).

Здесь также таймер выдержки включается автоматически в тот момент, когда температура в печи войдёт в необходимый технологический интервал температур.

Этап 5. Охлаждение.

Возможны разные варианты охлаждения. Первый вариант – полное отключение и естественное охлаждение преимущественно за счёт излучения. Конвекционное охлаждение и охлаждение за счёт теплопередачи здесь сведено к минимуму из-за достаточно высокого разрежения. Второй вариант – плавное охлаждение в течение определённого времени, большего, чем при естественном охлаждении. Контроллер температуры должен в этом случае плавно снижать мощность нагрева.

В каждом из двух этих вариантов подача воздуха в печь возможна только в том случае, если температура в ней опустилась ниже порогового уровня $T_{\text{порог}}$. В контроллере температуры за подачу такого сигнала разрешения (и управления) должен отвечать соответствующий компаратор. Обратим внимание на особенность работы этого компаратора. Дело в том, что, как видно из рис. 5, на графике есть две точки, когда должен сработать компаратор, – на этапе разогрева и на этапе охлаждения. Но в компараторе в контроллере МЕТАКОН-6305 в этом случае применена функция так называемой отложенной сигнализации, когда компаратор игнорирует первое условие срабатывания после подачи сигнала «старт», а реагирует только на последующие. Это ещё один яркий пример функциональных возможностей, которыми обладает данный специализированный контроллер.

Этап 6. Отключение печи.

После охлаждения и запуска воздуха контроллер температуры должен полностью отключить нагреватели.

Многофункциональный ПИД-регулятор МЕТАКОН-6305

Итак, мы описали два характерных технологических процесса термической обработки материалов. Они обладают рядом схожих этапов. В процессе описания мы пытались сформулировать требования к некоторому контроллеру температуры, который бы



Рис. 6. Многофункциональный ПИД-регулятор МЕТАКОН-6305 с таймером выдержки

управлял температурно-временными режимами таких процессов с учётом всех упомянутых особенностей.

Примером такого контроллера температуры может служить многофункциональный ПИД-регулятор МЕТАКОН-6305, предназначенный для решения описанных задач (рис. 6). Контроллер МЕТАКОН-6305 относится к разряду конфигурируемых регуляторов, выпускаемых Научно-производственной фирмой «КонтрАвт». Такие контроллеры не требуют программирования, а все выполняемые функции и требуемые параметры и характеристики задаются с помощью настройки (конфигурирования) соответствующих параметров.

Укажем более детально те функциональные возможности специализированного контроллера температуры МЕТАКОН-6305, которые упоминались выше и которые необходимы для полномасштабного управления температурно-временными режимами с алгоритмом «нагрев–выдержка–охлаждение».

Алгоритм регулирования и автонастройка

Контроллер температуры МЕТАКОН-6305 предназначен для прецизионной термической обработки. Это обеспечивается как высокой точностью измерения с классом точности 0,1, так и точным регулированием температуры за счёт применения ПИД-алгоритма управления. Функция автонастройки облегчает настройку параметров ПИД-алгоритма и позволяет получать отличные результаты даже персоналу, не имеющему специальной подготовки в области регулирования.

В контроллере формируются два вида сигналов управления: дискретный

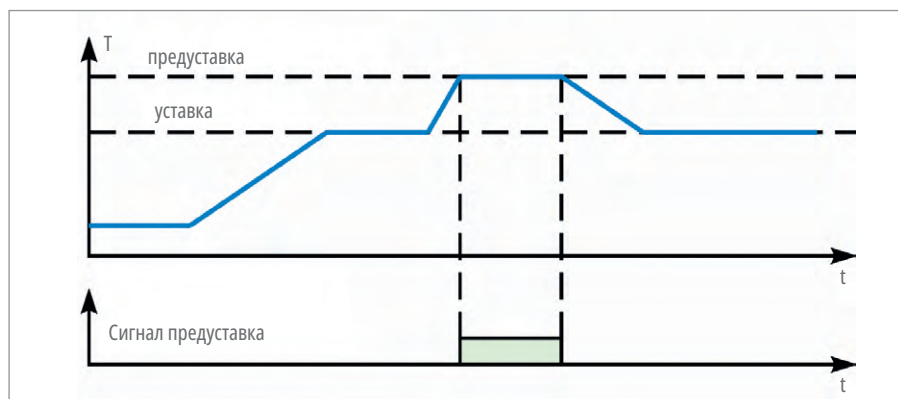


Рис. 7. Управление уставками и скоростями нагрева/охлаждения

сигнал с широтно-импульсной модуляцией и аналоговый токовый.

Кроме режима автоматического регулирования, в контроллере предусмотрен режим ручного управления. Переход между ними осуществляется безударно.

Управление уставками и скоростями нагрева/охлаждения

Наряду с основной уставкой в регуляторе может быть задана дополнительная уставка – предустановка. Переключение с уставки на предустановку может осуществляться внешним сигналом, кнопками с панели прибора или по интерфейсу (рис. 7). Такая возможность быстрой смены уставки «одним движением пальца» исключает хлопотный и долгий набор нового значения уставки кнопками с панели прибора.

Скоростями нагрева/охлаждения можно управлять. Скорости перехода на уставку и на предустановку задаются раздельно и выдерживаются регулятором в процессе работы. Таким образом, контроллер температуры МЕТАКОН-6305 позволяет не только поддерживать температуру на заданном постоянном уровне, но и управлять ею во времени по линейному закону с заданной скоростью.

Таймер пуска

Контроллер МЕТАКОН-6305 имеет таймер пуска, который запускает нагрев через заданное время после подачи сигнала СТАРТ. Функция очень полезна, когда разогрев оборудования занимает много времени и желательно начать разогрев заранее до выхода персонала на смену.

Таймер выдержки

Таймер выдержки в контроллере МЕТАКОН-6305 может быть запущен несколькими разными способами:

- безусловный запуск – запуск внешним сигналом (или кнопками с панели прибора, или по интерфейсу) без привязки к измеренной температуре;
- условный запуск – запуск после подачи внешнего сигнала (или с панели прибора, или по интерфейсу) при выполнении заданного условия на измеренную температуру. Чаще всего условием запуска считается попадание измеренной температуры в заданный интервал около уставки;
- запуск внутренним компаратором. Несмотря на сходство с предыдущим, такой способ даёт пользователю новые возможности. Например, для компаратора можно задать режим задержки срабатывания, при котором он срабатывает, только если условие срабатывания компаратора выполняется в течение определённого заданного времени. Тем самым мы исключаем запуск таймера выдержки от случайных кратковременных колебаний температуры.

Таймер готовности

По окончании термической обработки в течение заданного времени выдержки контроллер позволяет управлять некоторыми действиями.

В простейшем случае требуется подать сигнал готовности (сигнал окончания термообработки). Сигнал подаётся таймером готовности, который автоматически запускается по окончании времени выдержки. Вторым наглядным примером использования таймера готовности может служить формирование сигнала включения на заданное время вентилятора в камере полимеризации.

Отсчёт времени для всех трёх таймеров можно оперативно проконтролировать, при необходимости отсчёт можно досрочно завершить кнопками с панели прибора.

Управление внешними сигналами, кнопками с панели прибора, по интерфейсу

При разработке контроллера за основу была принята следующая концепция: оперативное управление работой контроллера (а значит, и электротермическим оборудованием) должно проводиться с помощью пультовых кнопок, расположенных на панели шкафа управления, а управление кнопками, расположенными на передней панели самого прибора, должно быть сведено к минимуму.

Во-первых, пультовые кнопки надёжнее, что очень важно в тяжёлых промышленных условиях. Во-вторых, в зависимости от выполняемой задачи пультовые кнопки имеют строго определённое функциональное назначение. Конкретное назначение кнопки может быть указано в идентификаторе кнопки. Всё это упрощает работу операторов.

Вместо пультовых кнопок в качестве источников сигналов управления могут быть использованы дискретные сигналы программируемых контроллеров, концевых выключателей, контактов реле и т.п. Для обработки этих сигналов управления в контроллере предусмотрены четыре дискретных входа: СТАРТ/СТОП, ПУСК ТАЙМЕРА, ПАУЗА, ПРЕДУСТАНОВКА.

Ретрансляция измеренного сигнала

Если аналоговый токовый сигнал не используется для управления, то он может быть применён для ретрансляции измеренного сигнала на регистрирующие устройства.

Компараторы, отложенная и задержанная сигнализация

Контроль за протеканием процесса осуществляют компараторы-сигнализаторы. Их число в приборе может достигать четырёх. Компараторы могут выполнять 16 разновидностей функций. Каждая функция характеризуется определённой зависимостью выходного сигнала от соотношения измеренного сигнала и уставок («Больше», «Меньше», «Попадание в интервал», «Попадание вне интервала»), а также способом задания порогов срабатывания компараторов, в том числе и порогов, «скользящих» вдоль изменяющихся уставок.

Сигналы компараторов могут быть использованы и для управления вспомогательными устройствами.

Контроль контура управления

В приборе предусмотрены различные варианты функциональной сигнализации. Например, он обнаруживает обрыв в линии связи с датчиком. Кроме того, в нём реализован алгоритм контроля обрыва контура управления (LBA). Алгоритм LBA обнаруживает любые нарушения в контуре управления. Например, перегорание ТЭНов, неисправность силовых коммутаторов, отсутствие питания в силовой сети, обрыв сигнала управления, размещение датчика температуры за пределами рабочей зоны нагрева.

Конфигурирование оперативного меню

Контроллер отличается многофункциональностью и гибкостью. Путём конфигурирования его можно настроить на выполнение широкого круга задач. Естественно, перед разработчиком при этом стоит непростая задача максимально облегчить работу оператора с прибором. С этой целью во всех новых приборах, разрабатываемых НПФ «КонтрАвт», используется такая возможность, как выбор состава оперативного меню. Дело в том, что в зависимости от решаемой задачи оператору необходимо контролировать, а при необходимости и изменять разный набор параметров. Часто состав этого набора определяется не только задачами, но и полномочиями, которые предоставлены оператору. Покажем несколько примеров настройки, ограничиваясь значением только одного параметра, который доступен для просмотра в режиме основной индикации на втором (нижнем) дисплее (на верхнем дисплее всегда отображается измеренное значение).

Вариант 1. Оператору важно наблюдать измеренное значение и уставку.

Вариант 2. Оператору важно наблюдать измеренное значение и его отклонение от уставки.

Вариант 3. Оператору важно наблюдать измеренное значение и его максимальное значение с момента последнего сброса (показания максимального логгера).

Вариант 4. Оператору важно наблюдать измеренное значение и оставшееся время выдержки.

Это только часть возможных вариантов, иллюстрирующих возможности по отображению информации в режиме основной индикации. Аналогично дело обстоит и с составом оперативного ме-

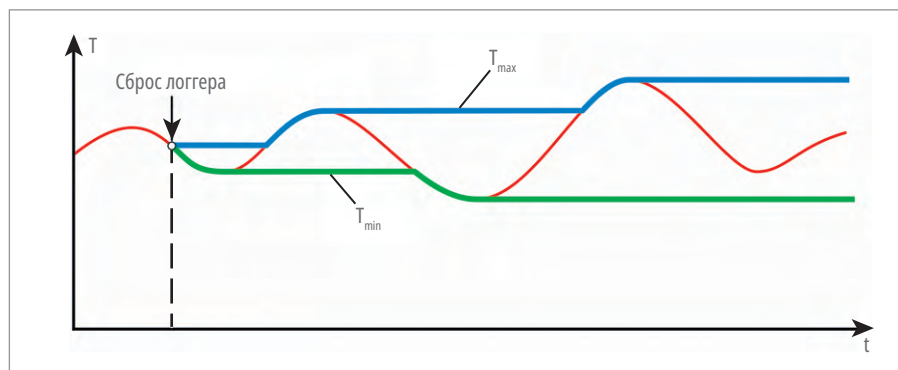


Рис. 8. Логгер фиксирует минимальное и максимальные значения параметра процесса после сброса

ню: в состав оперативного меню можно включить только те параметры и в том порядке, который наиболее часто используется оператором.

Кроме этого, с помощью пароля можно ограничить возможность изменения параметров оперативного меню.

Функция логгера

В контроллере МЕТАКОН-6305 реализована функция логгера. Прибор фиксирует минимальное и максимальные значения измеренного сигнала за период с момента последнего сброса (рис. 8). Эти значения доступны для просмотра с панели прибора, а также по сети RS-485.

Счётчик моточасов

Контроллер фиксирует суммарное время нахождения во включённом состоянии, то есть выполняет функции счётчика моточасов. Это позволяет оценивать время наработки как самого контроллера, так и оборудования, на котором он установлен (естественно, при условии, что питание контроллера и оборудования включается одновременно).

Встроенный источник 24 В

Встроенный источник стабилизированного напряжения 24 В может быть использован для питания датчиков, реле, индикаторов. Наличие такого источника упрощает систему и снижает её стоимость, особенно когда речь идёт о простых системах.

Обмен данными по сети RS-485

В сети RS-485 контроллер выполняет роль ведомого устройства (SLAVE). Набор параметров, доступных для чтения и записи по сети RS-485, составляет так называемую регистровую модель контроллера. В регистровую модель входят, например, измеренные значения, зна-

чения уставок, состояние дискретных входов, функции компараторов, состояние выхода компаратора и многие другие параметры.

Параметры регистровой модели можно не только считывать, но и устанавливать. Это значит, что по сети можно не только собирать данные о процессе и работе контроллера, но и управлять его работой.

Заключение

В данной статье вашему вниманию представлен специализированный контроллер, который оптимизирован для управления температурно-временными режимами в электротермическом оборудовании с реализацией алгоритма «разогрев-выдержка-охлаждение». При его разработке были максимально учтены особенности протекания технологических процессов в реальных промышленных условиях.

Важно отметить, что данный прибор оптимизирован не только с точки зрения выполняемых функций и учёта особенностей процесса. Он оптимизирует и системное решение.

Для того чтобы получить законченный шкаф управления, например, камерой полимеризации порошковой покраски, достаточно всего лишь следующего оборудования:

- конструктивная оболочка – собственно сам шкаф;
- контроллер МЕТАКОН-6305;
- датчик температуры (термопара и термопреобразователь сопротивления);
- силовой коммутатор – контактный пускатель или тиристорный/симисторный блок;
- автомат защиты;
- пультовые кнопки и индикаторы.

И это всё. При этом схемотехническое решение получается предельно простое, соответственно, и монтажные работы будут сведены к минимуму. ●