

УДК 62-503.57

DOI: 10.30987/article_5ba8a18a13c5b6.98496387

М.С. Денисов, В.Ф. Коростелёв

АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ЛИТЬЯ С КРИСТАЛЛИЗАЦИЕЙ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Исследована возможность программного управления процессом литья с кристаллизацией под давлением. В качестве объекта управления рассмотрен процесс наложения давления на расплавленный металл. Показано, что наложение давления на жидкий металл по некоторому закону, до начала кристаллизации, возможно за счет использования современных контрольно-измерительных приборов и средств автоматизации. Для проведения исследо-

ваний использован программно-аппаратный комплекс, позволяющий контролировать основные параметры технологического процесса литья с кристаллизацией под давлением.

Ключевые слова: литье с кристаллизацией под давлением, автоматизация, эталонная модель, адаптивная система управления, адаптивный регулятор, функциональная схема, структурная схема.

M.S. Denisov, V.F. Korostelyov

CONTROL AUTOMATION OF DIE CASTING PROCESS WITH CRYSTALLIZATION

As an object of control there is a process of pressure application upon melt under consideration. In the course of metal pressure shaping the atoms approach takes place at the elimination of some heat so that changes of a value and a speed of pressure application ensure atom approaches for different distances of elastic repulsive force actions till crystallization beginning.

A possibility of accumulation and changes of interatomic interaction elastic energy in molten metal is considered as a fundamental basis for the change of metal structure and properties connected with it. Thereupon at the study of the process it is necessary to determine significant factors and their impact upon

casting properties and on the basis of the mathematical description to determine laws of control.

In the paper it is shown that pressure application is possible to a melt according to a certain law, before crystallization beginning, at the expense of modern control equipment and automation means use.

This process represents a high significance in the creation of modern systems for manufacturing process control with the purpose of obtaining new kinds of materials with a specified combination of physical-chemical properties.

Key words: die casting with crystallization, automation, master model, adaptive control system, adaptive regulator, functional system, structural circuit.

Введение

Современные тенденции развития автоматизации в машиностроении связаны с информационным обеспечением процессов производства высококачественных изделий и заготовок с минимальными затратами ресурсов. В этой связи целью автоматизации все чаще становится управление технологическими процессами в режимах, обеспечивающих наилучшее соответствие между качеством продукции и затратами на ее изготовление. Еще более актуальной становится проблема прогнозирования и управления формированием свойств конечной продукции [1]. Получение высококачественной металлопродукции достижимо на основе контроля параметров об-

работки информации и принятия решений для организации управления процессами.

Производство деталей и изделий методом литья с кристаллизацией под давлением характеризуется экономичностью расходования металла, возможностью получать детали высокой точности с заданными физико-механическими и эксплуатационными свойствами. При обеспечении оптимальных параметров работы технологической системы, в частности за счет использования адаптивных систем управления технологическим оборудованием, достигается значительное увеличение показателей энергоэффективности производства.

В то же время необходимо управлять самим процессом формирования отливки,

а для этого требуется информация о влиянии каждого фактора в отдельности и всех

Методика исследования

Для проведения исследований использован программно-аппаратный комплекс, описанный в работе [2]. Комплекс состоит из нескольких блоков и модулей:

- пресса для литья с кристаллизацией под давлением (ПЛД-300);
- вакуумной системы;
- контрольно-измерительной систе-

факторов во взаимодействии.

мы;

- управляющей ЭВМ;
- устройства связи с объектом управления, а также специальной экспериментальной технологической оснастки.

Конструкция пресса представлена на рис. 1.

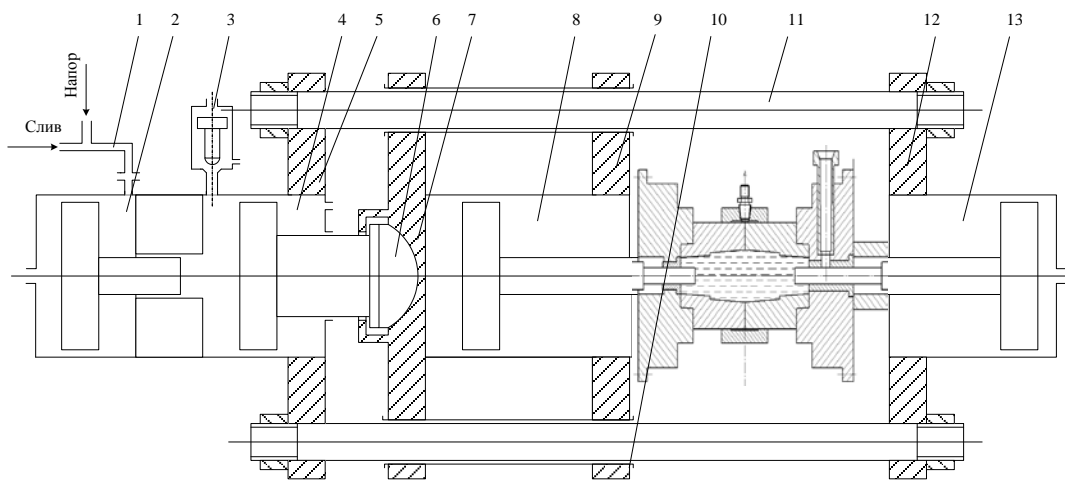


Рис. 1. Конструкция пресса

Пресс сконструирован как силовой агрегат, состоящий:

- из двух соосных встречно расположенных гидроцилиндров 8 и 13 (рис. 1), развивающих каждый в отдельности усилие 0,3 МН и рассчитанных на перемещение пресс-плунжеров на 125 мм, для непосредственного наложения давления на кристаллизующийся металл;

- гидроцилиндра замыкания формы с мультипликатором давления и клапаном высокого давления 3 (развиваемое гидроцилиндром 2 усилие - 3 МН, ход - 250 мм).

Принятая схема позволила сконструировать пресс, удобный для осуществления заливки металла, обслуживания рабочего пространства, ремонта и подготовки формы. Горизонтальная ось пресса находится на расстоянии 250 мм от уровня заливочной площадки, вертикальный просвет между колоннами 12 диаметром 100 мм составляет 150 мм, а горизонтальный - 500 мм.

Гидроцилиндры 2, 4, 8 и 13 унифицированы по внутреннему диаметру, который составляет 200 мм. Ход поршня мультипликатора 2, как и ход силового штока гидроцилиндра 4, равен 250 мм, соотношение площадей поршня и штока мультипликатора - 1:10, так что давление на поршень гидроцилиндра 4, удерживаемое клапаном 3, при давлении в гидросистеме, равном 10 МПа, составляет 100 МПа. Для удержания этого давления гидроцилиндр 4 запрессован в неподвижную плиту 5, что позволило значительно уменьшить наружный диаметр и при проектировании плит не выйти за пределы 650 x 500 (Ш x В) мм.

Плита пресса 5 оснащена усиленной направляющей в виде блока, в состав которого наряду с плитой 5 входят также промежуточная плита 7, гильзы 10. Гильзы выполнены с высокой точностью (Н7) как по поверхности контакта с колоннами 11, так и по поверхности запрессовки (h7) в плиты 5 и 7. Необходимую жесткость бло-

ку придает встроенный гидроцилиндр 8.

Для подвода рабочей жидкости к встроенному в подвижный блок гидроцилиндру использованы специальные телескопические гидроцилиндры; для подачи рабочей жидкости от гидроклапанов к исполнительным механизмам осуществлена разводка гнутыми патрубками из нержавеющей стали.

С целью изучения физико-механических свойств получаемых отливок спроектирована и изготовлена специальная технологическая оснастка (рис. 2), позволяющая выполнять поставленные задачи.

Принципиальная схема процесса приведена на рис. 2.

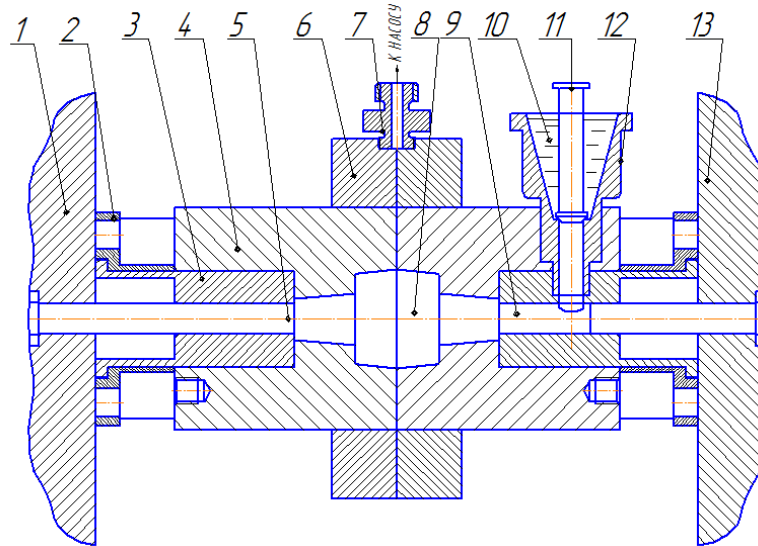


Рис. 2. Схема процесса: 1 - левая подвижная плита; 2 - левый упор; 3 - левая камера прессования; 4 - левая полуформа; 5 - левый прессующий плунжер; 6 - бандаж; 7 - штуцер для связи с вакуумным насосом; 8 - полость формы; 9 - правый прессующий плунжер; 10 - жидкий металл; 11 - стопор; 12 - заливочная чаша; 13 - правая неподвижная плита

Разработка ПИД-регулятора и формирование эталонной модели процесса

Принцип работы ПИД-регулятора: разница между текущим давлением и необходимым умножается на настраиваемый коэффициент, получается давление, которое необходимо выдать в данный момент на выходе устройства управления. Пропорциональная составляющая работает в момент появления рассогласования, то есть моментально откликается на изменение установленных значений. Когда плунжер начинает двигаться, давление падает, а когда достигает крайней отметки - выключается. Недостаток заключается в том, что эффект от воздействия проявляется с запаздыванием, а на объект воздействуют еще и внешние факторы: масса плунжера, сжимаемость рабочей жидкости, вибрация и др. Поэтому чисто пропорциональный регулятор колеблется вокруг точки под-

держания, и тем сильнее колеблется, чем больше воздействие внешних возмущений.

Управлять необходимо перемещением прессующего плунжера гидравлического пресса. Для этого используется гидравлический регулятор, который открывает/закрывает дроссельную заслонку и тем самым регулирует подачу рабочей жидкости в систему. Стоит учесть, что имеется компьютерная модель, которая указывает желаемое перемещение прессующего плунжера в зависимости от распределения температур в форме. Состояние объекта определяется давлением и перемещением.

Для реализации подобной задачи предлагается адаптивное регулирование давления рабочей жидкости на выходе из гидросистемы пресса по эталонной модели. Выбран блок системы адаптивного управления технологическим процессом

литься с кристаллизацией под давлением, который предназначен для сбора, обработки и передачи информации с датчиков температуры, давления и линейного перемещения прессующих плунжеров. Поэтому проектируемая система должна принимать информацию по аналоговым и цифровым портам, обеспечивать перевод ин-

формации в нормированные значения, сравнивать с эталонной моделью и в случае рассогласования корректировать подачу рабочей жидкости в гидросистему.

Структурная схема системы автоматического управления с адаптивным регулятором представлена на рис. 3.

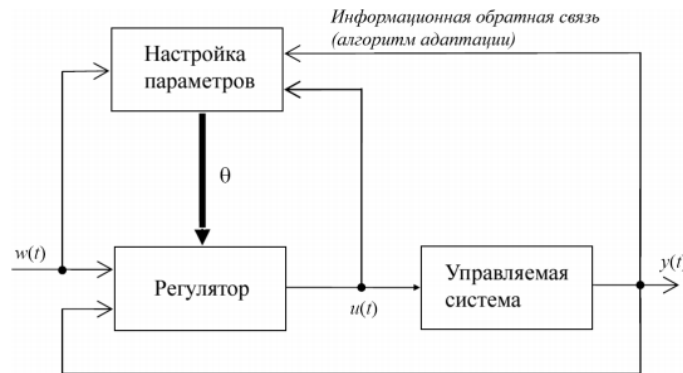


Рис. 3. Система с адаптивным регулятором

В адаптивном ПИД-регуляторе для сравнения задания (SP) и значения переменной процесса (PV) определяется значение рассогласования (e) [3]:

$$e = SP - PV.$$

Общая теоретическая формула расчета управляющего значения по ПИД-закону, как известно, выглядит так [4]:

$$u(t) = K_c \left(e + \frac{1}{T_i} \int_0^t e dt + T_d \frac{\partial e}{\partial t} \right)$$

где K_c - коэффициент пропорциональности регулятора; T_i - время интегрирования, мин; T_d - время дифференцирования, мин.

Пропорциональная составляющая управляющего воздействия определяется регулятором как

$$u_1(t) = \frac{K_c}{T_i} \int_0^t e dt$$

а дифференциальная составляющая равна [5]:

$$u_D(t) = K_c T_d \frac{\partial e}{\partial t}$$

Для синтеза системы регулирования с инструментами библиотеки ПИД-регулирования ОВЕН достаточно вставить виртуальный инструмент в окно редактора диаграмм и задать для него нужные входные и выходные переменные. Если связать входы и выходы регулятора с инструментальными платами, то результатом будет

проектируемая система регулирования в режиме реального времени.

Разработанный вариант системы управления с адаптивным ПИД-регулятором, реализующий принципы структурной и параметрической адаптации, относится к системам с дискретным временем. Свойства объекта управления остаются неизвестными, а математическая и компьютерная модели являются эталонном, на основе значений которого система принимает решения. Непрерывное время разбивается на циклы, а циклы на шаги. Рассогласование задающего воздействия и выходной величины управляемого объекта в нашем случае является входной величиной. При помощи алгоритмов оценивания на основе эталонной модели сигнал рассогласования обрабатывается и анализируется на каждом цикле. На участке идентификации по заданному показателю, измеряемому и вычисляемому в ходе технологического процесса управления, связанного с точностью и качеством регулирования, на каждом шаге или на протяжении ряда шагов происходит автоматический выбор модели оцениваемого процесса. В течение одного шага положение исполнительного механизма остается неизменным. Самоорганизация системы адаптивного управле-

ния осуществляется при помощи принятых алгоритмов оценки состояния системы, которые являются взаимосвязанными, фильтрации информации на входе в систему, адаптации автоматически формируемой структурной и параметрической модели и автоматически вычисляемых наиболее оптимальных управляющих воздействий. Оценка состояния и идентификация параметров технологического процесса и характеристик объекта управления реализуется с помощью экспериментальных данных. Алгоритмы оценивания и идентификации позволяют определять структуру эталонной модели объекта управления и воспроизводить параметры этой модели,

т.е. реализовывать принципы структурной и параметрической адаптации.

Выбранный блок системы адаптивного управления технологическим процессом литья с кристаллизацией под давлением предназначен для сбора, обработки и передачи информации с датчиков. Соответственно созданная система должна принимать информацию по аналоговым и цифровым портам, обеспечивать перевод информации в нормированные значения, сравнивать с эталонными значениями и выдавать результат на экран ПК, а также выдавать управляющий сигнал с цифрового порта на основной блок управления.

Разработка и анализ функциональной и структурной схем системы управления

Перед системой управления технологическим процессом литья с кристаллизацией под давлением ставились следующие основные задачи:

- обработка информации с контрольно-измерительных приборов в максимально точном и подробном виде, визуализация обработанной информации;
- построение компьютерной модели технологического процесса;
- анализ работы оборудования на основе сравнения информации с датчиков и компьютерной модели;
- рекомендации по выбору оптимальных рабочих параметров;
- генерация эталонной модели технологического процесса;

- самодиагностика оборудования;
- отображение информации для оператора;
- возможность исключения оператора из технологического цикла;
- возможность работы в автоматическом режиме.

В соответствии с данными требованиями разработана структурная схема адаптивной системы управления технологическим процессом литья с кристаллизацией под давлением. Процесс осуществляется на гидравлическом прессе. На структурной схеме (рис. 4) показаны основные аппаратные узлы системы.

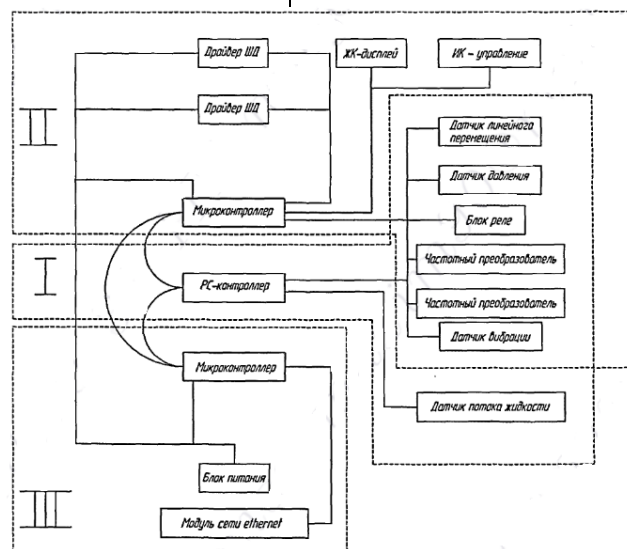


Рис. 4. Структурная схема

На основании проведенного анализа структурной схемы спроектирована функциональная схема автоматизации техноло-

гического процесса литья с кристаллизацией под давлением (рис. 5).

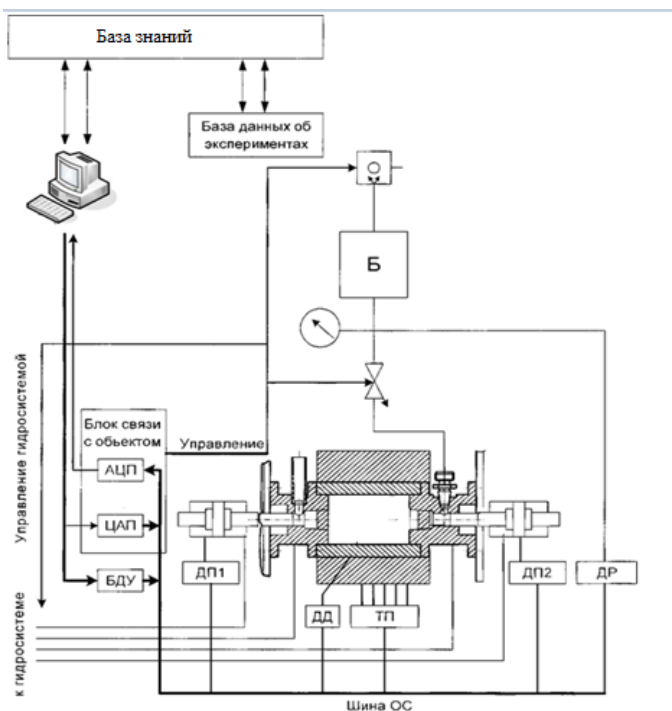


Рис. 5. Функциональная схема технологического процесса: ДП - датчик положения; ДД - датчик давления; ДР - датчик разрежения; ТП - термопары; Б - вакуумный бустер; АЦП - аналого-цифровой преобразователь; ЦАП - цифро-аналоговый преобразователь; БДУ - база данных управления

Функциональная схема является основным проектным документом, определяющим структуру и уровень автоматизации технологического процесса проектируемого объекта и оснащение его приборами и средствами автоматизации (в том числе средствами вычислительной техники). Изображение агрегатов на схеме соответствует их действительной конфигурации или принятым условным обозначениям и схематическим изображениям. Система в режиме реального времени снимает информацию с датчиков, после чего через АЦП информация передается на компьютер, который является пультом оператора. ЭВМ обрабатывает информацию и сравнивает значения со значениями, полученными путем компьютерного моделирования технологического процесса. Если система обнаруживает отклонение одного из параметров технологического процесса, она выдает оператору рекомендации по оптимизации работы. Если оператор оказыва-

ется вне рабочего места, блок переключателей включает режим автоматической работы, в котором АСУ регулирует параметры технологического процесса с помощью частотных преобразователей и блоков реле.

Функциональная схема выявляет необходимость анализа основных контролируемых параметров гидравлического прессы, которую система адаптивного управления учитывает в программном коде. Алгоритм части системы управления анализом основных параметров описывает следующее: логическим условием определяются выбранные оператором предварительно заданные параметры, в которые входят режим работы программы, марка сплава, параметры нагружения и т.д.; производится анализ результатов вычислений подпрограмм, вывод результатов и повтор вышеописанного - пока выполняется условие цикла.

Проведенные разработки структурной и функциональной схем автоматизации технологического процесса позволяют детально проработать все элементы системы до начала ее проектирования и создания. Последующими этапами являются выбор инструментальных и программных средств реализации системы, проектирование вычислительных и управляющих алгоритмов и их программная реализация. Основная роль в данной системе отведена программе управления, предустановленной на ПК, и именно ПК является пультом оператора, а предустановленная программа управления представляет собой связующее звено, позволяющее обработать всю информацию и создать управляющие воздействия.

Анализируя структурную и функциональную схемы адаптивной системы управления, стоит обратить внимание на контроллеры: микроконтроллеры и РС-контроллер. Основная система управления базируется на РС-контроллере, и именно в нем находится система управления компьютерного моделирования и сравнения результатов работы оборудования с результатами моделирования. Однако для повышения производительности, надежности и функциональности системы управления часть неосновных задач переносится на микроконтроллер. При этом из схемы

видно, что один из микроконтроллеров отвечает за управление ШД дроссельной заслонки и активируется, если управление частотой вращения двигателя гидронасоса недостаточно для получения требуемых параметров, а также выводит информацию о работе оборудования на ЖК-дисплей. Кроме того, этот микроконтроллер необходим для формирования отчетов и отправки их в базу данных. Также в контроллеры добавлена функция обратной связи, что позволяет диагностировать систему управления и работу оборудования.

Общая структура системы управления представлена на рис. 6. Во время работы оборудования в автоматическом режиме РС-контроллер задает начальные значения $x(t)=p_0(t), x_0(t), v_0(t)$, воздействуя на частоту вращения двигателя гидравлического насоса ω и расход жидкости, проходящей через дроссель, q . Датчики, установленные на гидравлическом прессе, передают измеряемые параметры на блок самонастройки, который, сравнивая данные, полученные экспериментальным путем и путем компьютерного моделирования, вычисляет корректирующий коэффициент $k_{кор}$, используя логический закон управления: если $|p_{эксн}| < 0,2 |p_{мат}|$, то $k_{кор} = p_{эксн} k_1$, где $k_1 < k_2$. Регулятор формирует управляющее воздействие $U(t)$ и передает его используемому контроллеру [6].

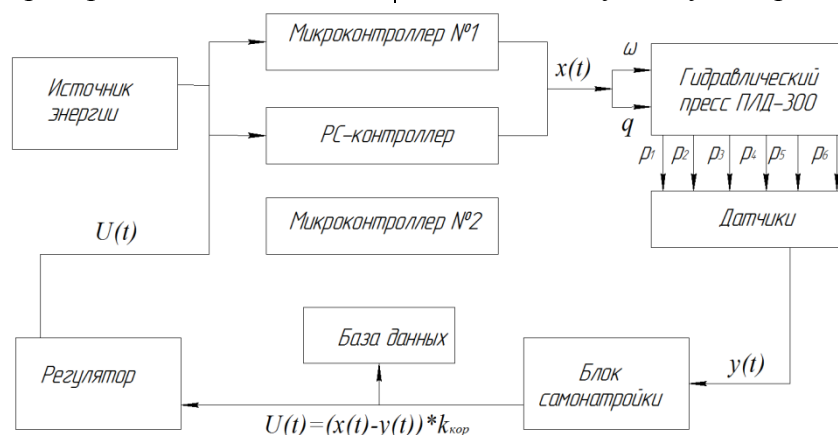


Рис. 6. Общая структура системы управления

Новизна системы управления заключается в разработанном принципе комбинированного управления, объединяющем принцип управления по отклонению и логический нелинейный закон управления.

При этом по принципу управления по отклонению система описывается передаточной функцией разомкнутой системы и уравнением замыкания:

$$x(t) = g(t) - y(t) Woc(p).$$

Суть алгоритма работы системы заключается в стремлении свести ошибку $x(t)$ к нулю.

Одно из достоинств такой схемы заключается в том, что обратная связь приводит к уменьшению ошибки независимо от факторов, ее вызвавших (изменений параметров регулируемого объекта или внешних условий).

Нелинейные законы управления могут иметь иные формы, которые реализуются с помощью не функциональных, а более или менее сложных логических устройств. Назовем их логическими нелинейными алгоритмами. В системе логический нелинейный алгоритм применен для эко-

номии управляющих воздействий на объект, а также экономии расхода энергии [7; 8].

Для наложения на расплавленный металл давления по заданному закону в управляющей программе предусмотрена возможность управления параметрами гидравлического регулятора. Данный принцип управления обеспечивает широкие пределы регулирования как по величине давления, так и по времени его поддержания. Такой подход позволяет эффективно использовать возможности программирования без включения в гидросистему дополнительных элементов.

Программная реализация системы управления

Установив зависимость параметров структуры обрабатываемого материала от закона изменения давления $p(\tau)$ или от положения прессующих плунжеров $x(\tau)$, создают адаптивную систему, которая динамические свойства гидропривода приводит в соответствие с поведением расплавленного металла под давлением.

Для реализации адаптивного регулирования процесса подачи рабочей жидкости в гидроцилиндр предполагается использование программируемого логического контроллера ОВЕН. В качестве среды и языка программирования контроллеров была выбрана среда разработки CoDeSeS с языком программирования C++. Основными преимуществами контроллеров ОВЕН являются: открытая архитектура, что облегчает их встраивание в вертикально интегрированные среды разработки; мощные аппаратные ресурсы - быстро-

действующий процессор и большой объем оперативной и энергонезависимой памяти; возможность программирования контроллеров в наиболее распространенной среде программирования CoDeSys. Сегодня CoDeSys (controller development system) - самый распространенный в мире аппаратно-независимый комплекс для прикладного программирования промышленных логических контроллеров. Основной компонент - это среда программирования на языках стандарта МЭК 61131-3. Программы компилируются в машинный код и загружаются в контроллер. Любая задача, решением которой является программа, реализуется в CoDeSys. Аппаратная реализация выполнена в полном соответствии с ГОСТ Р 51840-2001 (IEC 61131-2), что обеспечивает высокую аппаратную надежность (рис. 7).

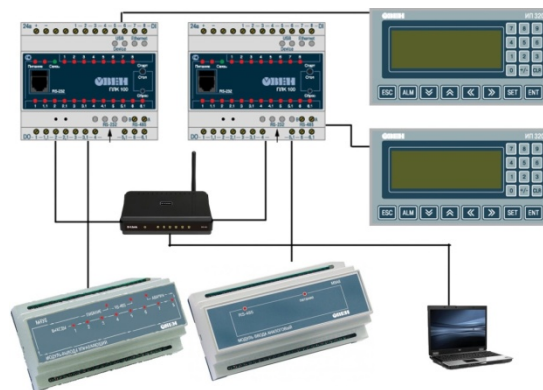


Рис. 7. Схема управления

Программирование контроллеров осуществлялось на языке ST (structured text, структурированный текст), который представляет собой язык высокого уровня, имеющий черты языков Pascal и Basic.

Данный язык имеет те же недостатки, что и IL, однако они выражены в меньшей степени. Пример программы на языке ST приведен на рис. 8.

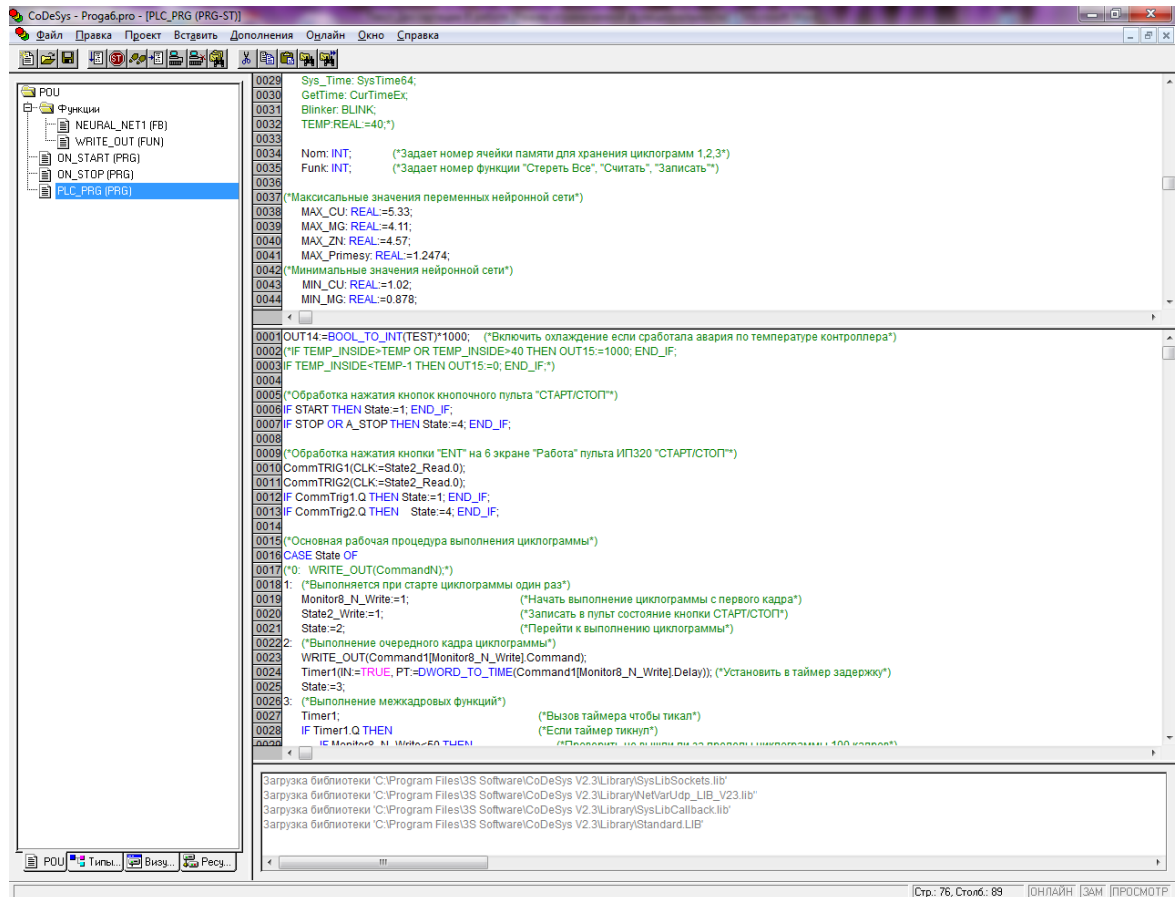


Рис. 8. Пример программы

С помощью ST можно легко реализовать арифметические и логические операции (в том числе побитовые), безусловные и условные переходы, циклические вычисления; возможно использование как библиотечных, так и пользовательских функций.

Реализация позволяет задавать программу работы пресса в автоматическом режиме, в соответствии с поставленными задачами. Имеется возможность записывать программу в базу данных, таким образом, повторное составление программы

для определенного технологического процесса не требуется.

Окно запуска отработки программы в соответствии с эталонной моделью представлено на рис. 9.

Оператору достаточно нажать «Пуск» и следить за выполнением работы программы. Также на данное окно выводятся значения перепада давления в пресующем гидроцилиндре. Окно прогноза формирования свойств на выходе выводится для оператора (рис. 10).

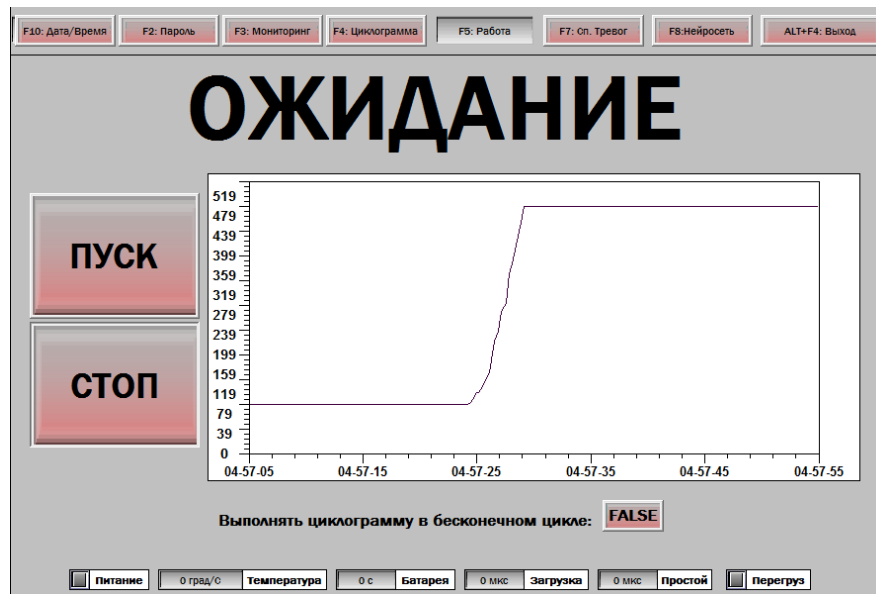


Рис. 9. Окно работы

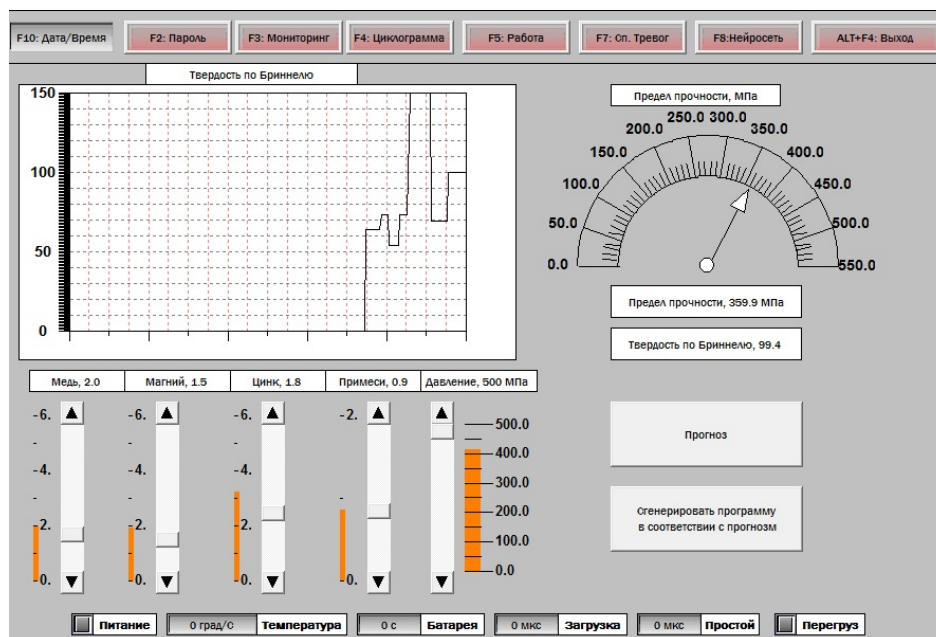


Рис. 10. Окно прогнозирования

Осциллографирование перемещения плунжеров, изменения давления в гидросистеме, изменения усилия запирающей формы позволяет уточнить значения свойств жидкого металла и установить важные кинетические закономерности. Осциллограмма наложения давления прессующими плунжерами приведена на

рис. 11.

Таким образом, для регулирования давления жидкости в гидросистеме пресса, произведена замена традиционных методов регулирования с постоянной настройкой на адаптивное регулирование на базе промышленных логических контроллеров.

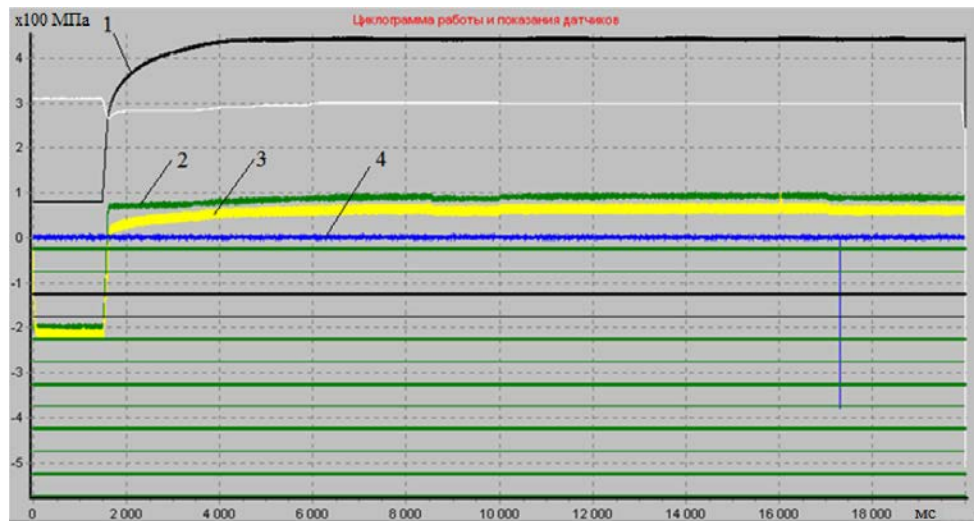


Рис. 11. Оциллограмма работы и показания датчиков: 1 - перемещение прессующего плунжера 1; 2 - перемещение прессующего плунжера 2; 3 - давление в системе; 4 - перемещение плиты

Выводы

1. Разработана система автоматизированного управления, включающая блок анализа текущего состояния работы оборудования, блок сравнения данных о текущем состоянии работы оборудования с моделью, блок управления технологическим процессом по эталонной модели с учетом математических моделей процесса формирования отливки.

2. Подобрано оборудование, входящее в состав системы автоматизированного управления, которое включает в себя РС-контроллер, микроконтроллеры, датчики линейного перемещения, датчики давления и температуры.

3. Разработана методика управления и настройки ПИД-регулятора, основанного на программных алгоритмах, реализованных в среде программирования C++.

4. Разработанная система управления технологическим процессом может быть использована и для других моделей прессов и технологических операций литья с кристаллизацией под давлением.

5. Использование предлагаемой технологии обеспечивает возможность в комплексе решать вопросы оптимизации параметров технологии и достижения требуемого сочетания свойств сплавов и литых изделий из них.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Korostelev, V.F. Development of casting process for pressings of pistons of car augmented engines / V.F. Korostelev, M.S. Denisov // *Metal Science and Heat Treatment*. - 2017, January. - Vol. 58. - Nos. 9-10.
2. Korostelev, V.F. Analysis of dependence of the properties of alloy V95 on the pressure applied to crystallizing metal / V.F. Korostelev, L.P. Khromova, M.S. Denisov // *Metal Science and Heat Treatment*. - 2017, May. - Vol. 59. - Nos. 1-2.
3. Jan, R.M. Robust PID Control Design for Permanent Magnet Synchronous Motor: A Genetic Approach / R.M. Jan, C.S. Tseng, R.J. Liu // *Electr. Power Syst. Res.* - 2007. - № 7. - P. 1161-1168.
4. Elmas, C. A Neuro-Fuzzy Controller for Speed Control of a Permanent Magnet Synchronous Motor Drive / C. Elmas, O. Ustun, H.H. Sayan // *Exp. Syst. Appl.* - 2008. - № 1. - P. 657-664.
5. Keshtkar, S. Tethered Space Orientation via Adaptive Sliding Mode / S. Keshtkar, A. Poznyak // *Int. J. Robust. Nonlin. Control*. - 2016. - Vol. 26. - № 8. - P. 1632-1646.
6. Александров, А.Г. Синтез регуляторов по показателям точности и быстродействию. II. Неминимально-фазовые объекты / А.Г. Александров // *Автомат. и телемех.* - 2017. - № 6. - С. 3-17.
7. Рутковский, В.Ю. Особенности динамики адаптивной системы управления с нелинейной эталонной моделью. II / В.Ю. Рутковский, В.М. Глумов // *Автомат. и телемех.* - 2017. - № 5. - С. 83-95.
8. Рутковский, В.Ю. Особенности динамики адаптивной системы управления с нелинейной эталонной моделью. I / В.Ю. Рутковский, В.М. Глумов // *Автомат. и телемех.* - 2017. - № 4. - С. 92-105.

1. Korostelev, V.F. Development of casting process for pressings of pistons of car augmented engines / V.F. Korostelev, M.S. Denisov // *Metal Science and Heat Treatment*. - 2017, January. - Vol. 58. - Nos. 9-10.
2. Korostelev, V.F. Analysis of dependence of the properties of alloy V95 on the pressure applied to crystallizing metal / V.F. Korostelev, L.P. Khromova, M.S. Denisov // *Metal Science and Heat Treatment*. - 2017, May. - Vol. 59. - Nos. 1-2.
3. Jan, R.M. Robust PID Control Design for Permanent Magnet Synchronous Motor: A Genetic Approach / R.M. Jan, C.S. Tseng, R.J. Liu // *Electr. Power Syst. Res.* - 2007. - № 7. - P. 1161-1168.
4. Elmas, C. A Neuro-Fuzzy Controller for Speed Control of a Permanent Magnet Synchronous Motor Drive / C. Elmas, O. Ustun, H.H. Sayan // *Exp. Syst. Appl.* - 2008. - № 1. - P. 657-664.
5. Keshtkar, S. Tethered Space Orientation via Adaptive Sliding Mode / S. Keshtkar, A. Poznyak // *Int. J. Robust. Nonlin. Control*. - 2016. - Vol. 26. - № 8. - P. 1632-1646.
6. Alexandrov, A.G. Regulator synthesis on indices of accuracy and operating speed. II. Non-minimal-phase objects / A.G. Alexandrov // *Automation and Teleautomatics*. - 2017. - No. 6. - pp. 3-17.
7. Rutkovsky, V.Yu. Dynamics peculiarities of adaptive control system with non-linear master model. II / V.Yu. Rutkovsky, V.M. Glumov // *Automation and Teleautomatics*. - 2017. - No. 5. - pp. 83-95.
8. Rutkovsky, V.Yu. Dynamics peculiarities of adaptive control system with non-linear master model. II / V.Yu. Rutkovsky, V.M. Glumov // *Automation and Teleautomatics*. - 2017. - No. 4. - pp. 92-105.

Статья поступила в редакцию 29.04.18.

*Рецензент: д.т.н., профессор Владимирского государственного университета
Сысоев С.Н.*

Статья принята к публикации 10.05.18.

Сведения об авторах:

Денисов Максим Сергеевич, аспирант кафедры «Автоматизация технологических процессов» Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, e-mail: denisovmaxim90@mail.ru.

Denisov Maxim Sergeevich, Post graduate student of the Dep. "Engineering Process Automation", Stoletovs State University of Vladimir, e-mail: denisovmaxim90@mail.ru.

Коростелев Владимир Федорович, д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Автоматизация технологических процессов» Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, e-mail: giess300@mail.ru.

Korostelyov Vladimir Fyodorovich, Dr. Sc. Tech., Prof., Head of the Dep. "Engineering Process Automation", Stoletovs State University of Vladimir, e-mail: giess300@mail.ru.