

О. И. Шинский, Н. Д. Круцкевич, Б. М. Шевчук

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

Построение интегрированной компьютерной сети дистанционного мониторинга параметров технологических процессов в литейном производстве

Рассмотрены вопросы построения интегрированной компьютерной сети дистанционного мониторинга параметров технологических процессов литейного производства с применением SCADA-систем и беспроводных локальных сетей. Предложены подходы организации сетей сбора мониторинговых данных и их передачи, обработки, визуализации.

Ключевые слова: литейное производство, сенсорные сети, абонентские системы, беспроводные сети

Экономическая ситуация, сложившаяся в настоящее время, требует от литейных предприятий выпуска продукции, конкурентоспособной на внутреннем и внешнем рынках. Конкурентоспособность во многом определяется стоимостью и качеством продукции, что, в свою очередь, обусловлено применяемой технологией, контролем за точностью ее соблюдения, а также количеством и стоимостью используемых в работе материалов.

Анализ технологии, применяемой при работе литейных цехов, показал, что необходимо вести более точный контроль за сбором и обработкой информации о состоянии каждого этапа производства отливки и оперативно представлять эту информацию операторам в виде различного рода графиков и таблиц с использованием предыстории процесса.

Решение проблем повышения качества литейного производства рассмотрено в [1-3]. Повышение эффективности работы литейных цехов в значительной степени определяется качеством и обоснованностью проектных решений, применением компьютеризированных комплексов и экспертных систем. Ключевыми проблемами повышения качества литейного производства являются контроль и поддержка в заданных пределах характеристик и параметров технологических процессов литья, показателей и параметров исходных материалов и режимов работы оборудования, а также оперативное выявление и замена недоброкачественных материалов, прогнозирование неисправностей оборудования и т. д. Эти задачи решаются с помощью применения многоуровневой интегрированной компьютерной сети мониторинга и системы контроля и диспетчеризации (SCADA) процесса литейного производства [4].

Целью статьи является анализ комплекса проблем, связанных с автоматизацией литейного производства, оперативного мониторинга и управления качеством отливок, а также анализ характеристик сетевых устройств сбора, обработки, кодирования и передачи информации для построения малогабаритных и мобильных средств оценки и коррекции состояний объектов литейного производства. Внедрение

интегрированной компьютерной сети дистанционного мониторинга параметров технологических процессов с системой диспетчеризации SCADA, средств обработки и передачи информативных данных, характеризующих качество выполнения технологических процессов литья, позволит эффективно организовать управление литейным производством с учетом минимизации затрат и повышения качества отливок.

Анализ подходов к построению компьютеризированных систем в литейном производстве

Автоматизация литейного производства привела к тому, что качество и надежность функционирования автоматизированных формовочных и литейных линий, различных механизмов литейных цехов существенно влияют на конечный результат производства. В свою очередь, автоматизированные комплексы и машины управляются и контролируются физическим и умственным трудом большого количества людей. При этом влияние человеческого фактора на качество производства существенно увеличивается, что требует организации обеспечения качества производства на его различных уровнях.

На рис. 1 представлена структурная схема технологических процессов литейного производства.

Интегрированную систему мониторинга можно распределить на 14 этапов подсистем мониторинга.

Как видно из рис. 1, изделие проходит этапы от компьютерной модели к готовой продукции, соответственно, важен мониторинг параметров каждого этапа производства, чтобы добиться высокого качества и снизить энергетические затраты.

При создании трехмерной модели изделия и чертежей большинство производителей литейной оснастки используют специализированные CAD-системы, что позволяет сократить срок выполнения заказа, особенно для сложных литейных форм, повысить качество и увеличить производительность. Система автоматизированной поддержки инженерных реше-

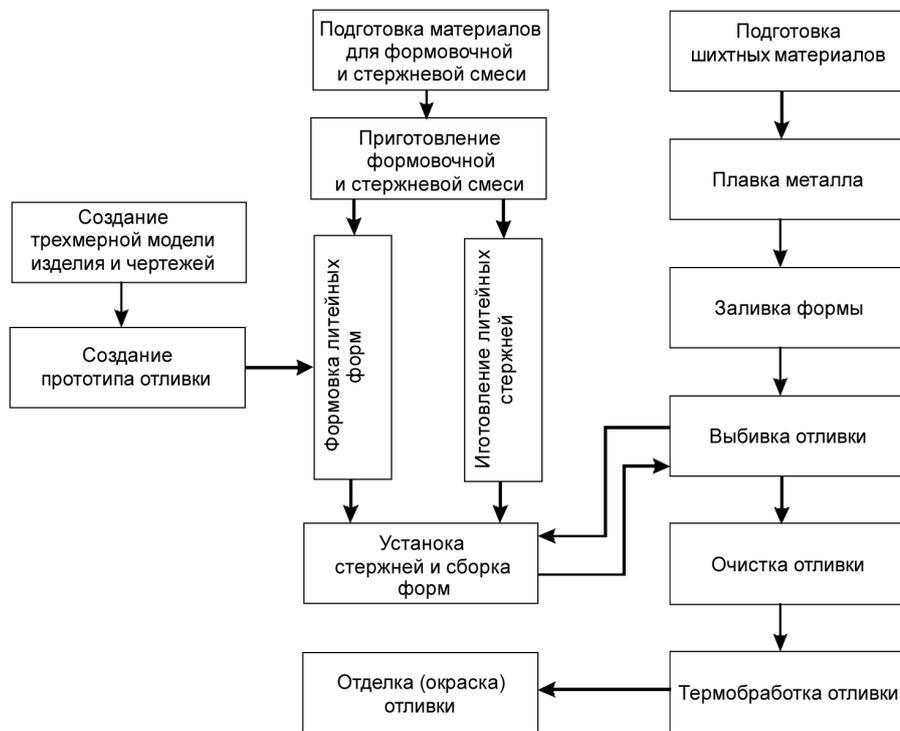


Рис. 1. Структурная схема технологических процессов литейного производства

пока решение задачи на последней стадии не сведется к простому математическому или логическому решению.

Исходными данными для проектирования формы являются чертеж детали и технические условия на ее изготовление, по которым необходимо определить рабочие поверхности, точку (место) впрыска расплава, линию разъема формы, вид (модель) литейной формы, ориентацию детали (деталей) в форме.

По указанному в чертеже материалу в системе проектирования формы определяются свойства литейного материала – температурные режимы переработки материала: плотность, удельная масса, коэффициент температуропроводности, коэффициенты усадки и др.

Следующим этапом является создание прототипа изделия или формы с помощью технологий быстрого прототипирования, получаемые с помощью 3D-принтеров на литейных предприятиях.

Технология быстрого прототипирования (Rapid Prototyping – RP) – это быстрое изготовление прототипов, технология, позволяющая по данным из 3D CAD-приложений (SolidWorks, КОМПАС-3D, Autodesk Inventor и прочих) создавать трехмерные физические модели-прототипы без инструментального их изготовления. Технология стала доступной благодаря появлению 3D-принтеров, принцип работы которых заключается в послойном формировании физической модели. Традиционный метод изготовления модели заключается в том, что модель создается отделением материала от заготовки, скреплением отдельных элементов модели. При традиционном методе происходит инструментальное изготовление модели – процесс трудоемкий, медлительный, при котором невозможно изготовить сложные модели. 3D-принтеры позволяют в течение нескольких часов изготовить геометрически сложные прототипы с внутренними элементами и движущимися частями. Процесс построения автоматизирован и позволяет получать качественные, сравнительно недорогие, функциональные модели в кратчайшие сроки [8].

Как известно, для изготовления моделей многие предприятия используют макетные мастерские на базе деревообрабатывающих цехов. Невозможность изготовить несколько абсолютно идентичных изделий, наличие специально обученного персонала, трудоемкость процесса, мастерские, занимающие много места, – это неполный перечень основных недостатков традиционного изготовления мастер-моделей из дерева или пенополистирола. Автоматизировать процесс изготовления моделей можно с помощью 3D-принтера, который позволяет вносить коррективы геометрии.

ний при проектировании форм для литья обеспечивает:

- сокращение трудоемкости проектных расчетов, конструирования и выпуска рабочих чертежей форм за счет всесторонней информационной поддержки проектирования (базы данных, графические базы знаний, расчетные процедуры), автоматизации принятия проектных решений, автоматизации редактирования и выпуска конструкторской текстовой и графической документации;
- сокращение времени проектирования форм за счет применения типовых конструкций, выступающих в качестве моделей, с сохранением качества;
- автоматизацию расчетов блока и пакета формы с учетом размеров рабочей зоны;
- редактирование чертежей форм без повтора расчетных процедур;
- получение конструкторской документации в более короткий срок;
- быструю разработку новых моделей специалистом-конструктором и подключение их к существующей базе типовых решений.

Проектирование формы можно разбить на следующие этапы: расчет размеров полуфабриката и выбор технологических условий; разработка рабочей зоны формы (в данной версии выполняется вручную) и определение гнездности формы; выбор оборудования отливки; подбор формообразующей и выталкивающей систем формы и вида пакета формы; разработка формообразующей системы (расчет ФОД, литниковой системы и других); формирование пакета формы, систем выталкивания, крепления формы (расчет плит, фиксирующих фланцев и других), термостатирования и вентиляционной системы, сборочного чертежа формы.

Каждый этап в процессе проектирования необходимо разбивать на несколько стадий до тех пор,

Для литейных цехов не столь важны точностные характеристики моделей, возможность быстрого изменения математической виртуальной модели и повторного изготовления доработанного прототипа и, главное, эффективное использование в процессе литья изделий в металле.

В Украине на данный момент представлены 3D-принтеры двух разработчиков: Objet Geometries (Израиль) и Z-Corporation (США).

Компания Objet разработала комбинированную технологию PolyJet, суть которой заключается в послойном построении моделей из фотополимера. Фотополимер распыляется на плоскости построения 3D-принтера тонким слоем в 16 микрон блоком головок и полимеризуется под действием УФ ламп. В результате получаются довольно прочные и точные пластиковые модели с гладкими кривыми поверхностями.

3D-принтеры Z-Corporation изготавливают модели из порошка на гипсовой основе с различными добавками и присадками. На плоскости построения распределяется слой порошка толщиной 80 микрон и печатающая головка наносит связующее вещество (клей) согласно алгоритму данного слоя. В результате получают модели на гипсовой основе. Чтобы придать им требуемую прочность необходимо обработать пропиткой, которая также поставляется производителем, компанией Z-Corporation.

Литье по выплавляемым моделям (Lost-Wax) – один из самых экономичных способов создания деталей сложной формы из металла, а в некоторых случаях – и единственный возможный метод литья, например, когда детали имеют поднутрения, тонкие стенки или сложную конфигурацию. Обычно для такого метода литья используются модели из восковой модельной массы, изготовленные аналогично литью пластмасс под давлением: модельная масса запрессовывается в пресс-форму из алюминия. Этот процесс хорошо освоен и используется на практике тысячами литейных производств по всему миру. Однако среди недостатков использования данной технологии для небольших партий изделий следует назвать длительность процесса, начиная с разработки и заканчивая изготовлением, а также высокую стоимость оснастки для производства моделей.

Кроме того, модели, изготовленные на 3D-принтерах обоих производителей, можно использовать для литья в песчаные формы. В данном случае 3D-модели используются в качестве мастер-моделей, которые формуются в опоку.

Многие литейные компании за рубежом, использующие технологию быстрого прототипирования для сокращения цикла производства, не расположены открывать свои идеи по использованию 3D-моделей. Применение дополнительных материалов (жидкой резины, эпоксидных смол, платин-каст и прочих) совместно с 3D-моделями расширяет возможность использования последних в литейной индустрии.

Наряду с системами быстрого прототипирования разработка новых подходов оптимального управления технологическими процессами литья является актуальной задачей. Это обусловлено

развитием современных компьютерных систем управления, как правило, построенных на базе сетевых программируемых логических контроллеров и персональных компьютеров. При этом компьютер, обладая наиболее мощными вычислительными ресурсами, применяется для решения математически несложных задач: визуализации состояния элементов технологической системы, документирования параметров технологического процесса и программирования управляющей программы. Тем самым уникальным инструментом для интеллектуальной обработки информации, численных методов решения системы уравнений в обыкновенных и частных производных остается невостребованным.

Традиционный подход к управлению технологическими процессами литья включает следующие этапы: расчет режимов обработки на базе вероятностных моделей, формирование управляющей программы, синтез регуляторов по управляемым параметрам (рис. 2).

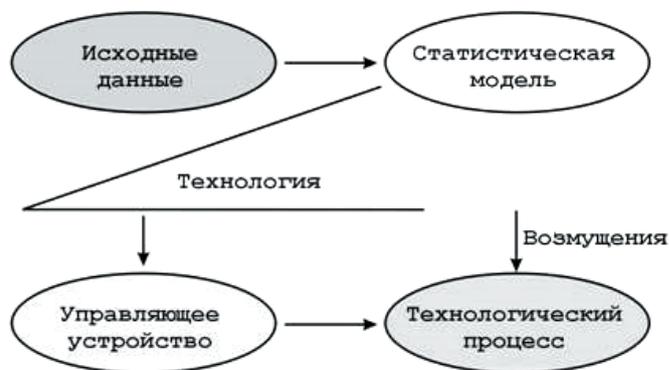


Рис. 2. Традиционный подход к управлению ТП

Априорный подход базируется на построении математической модели технологического процесса, определении целевой функции и метода оптимизации [7] (рис. 3). Цель оптимального управления – найти наилучший вариант из множества возможных альтернатив с позиции многоцелевой функции. Определяющую роль в методологии оптимального управления играет математическая модель, представляющая собой множество соотношений между

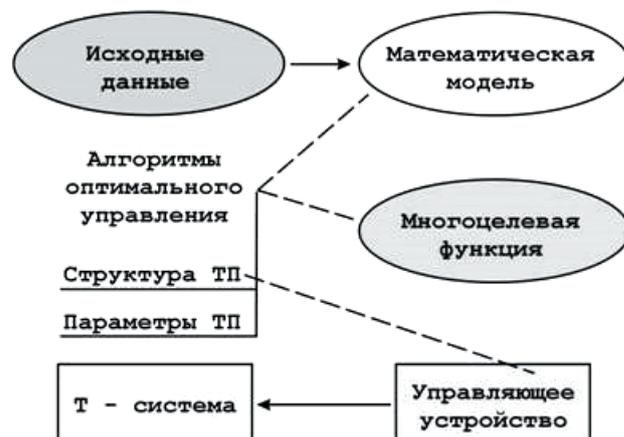


Рис. 3. Априорный метод оптимизации

переменными ограничениями и целевой функцией. Последовательность решения поставленной задачи включает следующие операции: формулировка задачи оптимального управления; разработка априорной математической модели; подготовка управляющей программы; уточнение решения.

Существующие априорные детерминированные математические модели не учитывают вероятностной природы технологических процессов. Поэтому точность априорной модели обычно недостаточна и при решении задачи оптимизации вероятностных технологических процессов целесообразно выделить априорный и оперативный методы оптимизации.

Оперативный метод оптимизации, базирующийся на обработке информации в реальном масштабе времени, позволяет существенно повысить качество управления.

Математическая модель позволяет корректировать технологию, адаптировать ее к реальному процессу, адекватно реагировать на возмущающие воздействия. Для таких систем свойственны неполный детерминизм, логичность действия и прогнозирования [7]. Таким образом, для данного подхода можно выделить две составляющие управления – априорная технологическая программа и математическая модель в реальном масштабе времени для корректировки управляющей программы. Общий принцип управления можно представить в виде следующей структурной схемы (рис. 4):

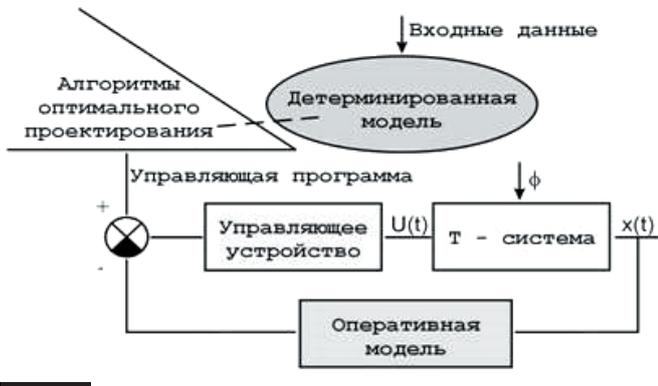


Рис. 4. Оперативный метод оптимизации

Метод управления технологическим процессом с обучением, смысл которого заключается в автоматической обработке результатов технологических процессов, их анализе и формировании вероятностных моделей – следующий этап развития (рис. 5). В качестве его примера можно привести операцию вакуумного отжига изделий с целью получения оптимальной структуры металла, снятия остаточных напряжений после термообработки, сохранения заданной формы изделий. Снижение концентрации водорода до величины, при которой отсутствуют явления



Рис. 5. Метод оптимизации с обучением

водородной хрупкости, определяет момент при расчете режима вакуумного отжига.

Величина равновесного давления P_p над металлом при небольших концентрациях водорода описывается уравнением Бореллиуса

$$P_p = \psi C^2 \exp \frac{\Delta H}{RT},$$

где ψ – коэффициент, зависящий от энтропии; ΔH – теплота растворения водорода в металле; R – универсальная газовая постоянная; T – температура; C – концентрация газа в металле.

Давление, обеспечиваемое вакуумной установкой, можно принять за равновесное давление водорода в уравнении Бореллиуса. Параметры ψ и ΔH определяются по экспериментальным данным. Зная значения концентрации газа в металле C , можно определить температуру вакуумного отжига.

Время снижения содержания водорода от исходной C_0 до конечной концентрации на половине толщины можно приближенно оценить последующим уравнениям:

– для цилиндра

$$\tau = \frac{r^2}{5,78 D} \ln \frac{C_0 - C_p}{C_k - C_p};$$

– для плиты или листа

$$\tau = \frac{h^2}{\pi^2 D} \ln \frac{C_0 - C_p}{C_k - C_p},$$

где r – радиус цилиндра, мм; h – толщина плиты (листа), мм; D – коэффициент диффузии водорода в металле; C_p – равновесная концентрация водорода в соответствии с уравнением Бореллиуса.

Таким образом, формируются необходимые параметры программы нагрева – скорость нагрева, температура отжига и время выдержки. По результатам анализа структуры металла после технологического процесса уточняются коэффициенты для расчета оптимальных параметров программы нагрева, то есть проводится процедура обучения с корректировкой коэффициентов. Скорость нагрева и охлаждения определяются из недопустимости коробления конструкции.

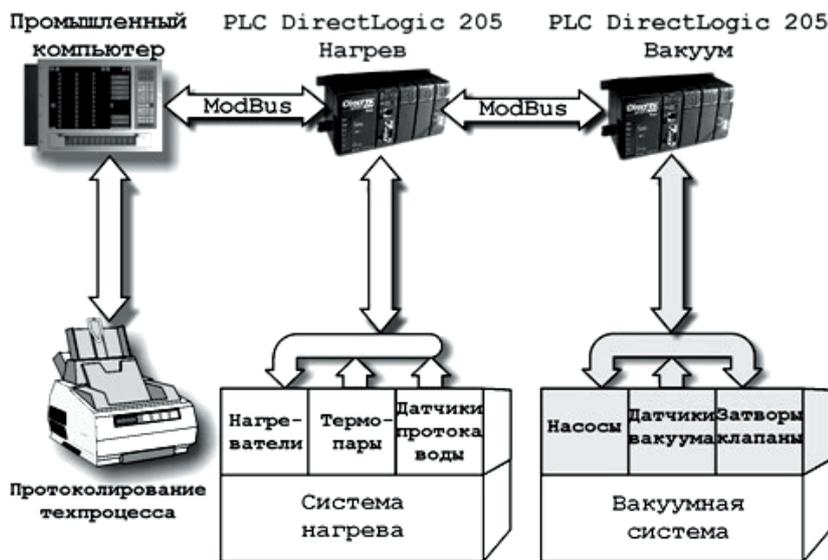


Рис. 6. Структурная схема системы управления

Представленная структурная схема системы управления (рис. 6) – иерархическая по информационной модели, функциям управления и архитектуре программного обеспечения. Организация связей и распределение задач между сетевыми ПЛК выполнены по территориальному и функциональному признакам. Такая архитектура СУ позволяет легко адаптировать систему под технологические системы любой сложности.

Программное обеспечение ПЛК обеспечивает многоконтурное регулирование температуры с любым количеством участков управляющей программы, расширенный диапазон изменения скорости нагрева и охлаждения, адаптивное управление нарастанием температуры с организацией обратной связи по давлению – остановка нагрева до набора рабочего вакуума. Алгоритм автоматического поддержания вакуума сокращает время технологического процесса и оптимизирует его.

При автоматизации литейного производства многие объекты технологического процесса явля-

ются мобильными частями производства, что усложняет задачу их интеграции в стандартную промышленную сеть.

Построение интегрированной сети промышленного назначения на основе беспроводных сенсорных и локальных сетей

Применение интегрированной сети беспроводных контроллеров и автономных сенсоров – перспективное направление автоматизации технологических процессов литейного производства, которое позволяет контролировать процессы, протекающие в мобильных элементах производства (вагонетки, ковши с расплавленным металлом и т. д.).

Для построения беспроводных сетей традиционно используют стандартизированные технологии (таблица) [5].

Технология IEEE 802.15.4, имеющая значительные преимущества – количество точек сети, дальность связи, варианты топологических схем, время

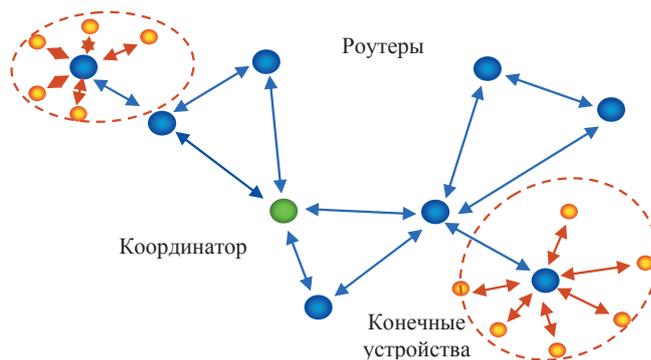


Рис. 7. Структурная схема беспроводной сети стандарта IEEE 802.15.4, организованной в топологию «сетка»

Сравнительный анализ характеристик беспроводных технологий

Название технологии	Zigbee, One-Net	Bluetooth	WiFi	UWB
IEEE стандарт	802.15.4	802.15.1	802.11	802.15.3
Максимальная скорость передачи	250 Kbps	750 Kbps	54 Mbps	1000 + Mbps
Ток при передаче	30 + ma	40 + ma	400 + ma	–
Ток в спящем режиме Idd	3 ua	200 ua	20 ma	–
Размер стека	8-60 KB	100 + KB	100 + KB	–
Тип топологии	звезда, дерево, сетка	звезда (8 точек max)	звезда	точка-точка
Время организации сети	мс	с	с	–
Максимальная длина пакета (байт)	132	359	4095	–
Расстояние передачи	свыше 1200 м	100 м	100 м*	10 м
Точки сети	65536	8	–	–

организации сети, как видно из таблицы, – наиболее оптимальная для промышленности. Объекты сети IEEE 802.15.4 – координатор, роутеры, конечные устройства (рис. 7).

Каждый элемент сети организован по структуре, показанной на рис. 8.

Структурная схема архитектуры интегрированной промышленной сети мониторинга процессов литейного производства представлена на рис. 9. В представленной архитектуре низовой уровень (уровень формирования технологических данных) реализован соответственно стандарту IEEE802.15.4. Данный стандарт регламентирует

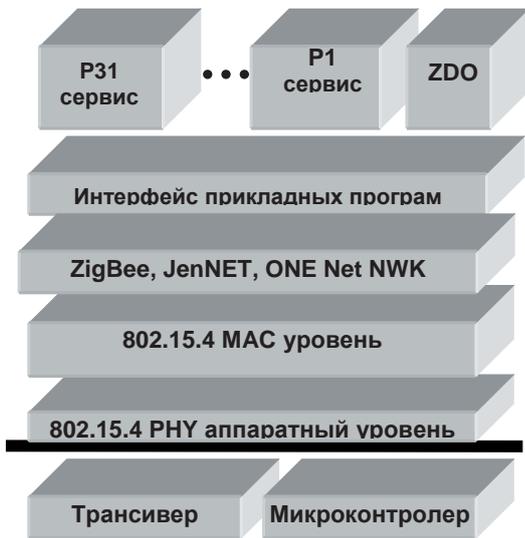


Рис. 8. Структурная схема элемента беспроводной сети стандарта IEEE 802.15.4

реализацию беспроводного физического и канального уровней низовой сети.

В качестве сетевого уровня используются технологии ZigBee, JenNET, OneNET. Они ориентированы на сети сенсоров на основе беспроводных компонентов и имеют ряд существенных преимуществ над другими технологиями: всемирно открытый стандарт IEEE 802.15.4; простая конфигурация сети; возможность ретрансляции пакетов отдельными узлами сети; число узлов сети может превышать 65 тыс.; защищенность сети в соответствии к алгоритму AES; поддержка различных топологий «дерево», «звезда», многоуровневая сеть; возможность работы с оборудованием различных сетей; электромагнитная совместимость с другими беспроводными технологиями (WiFi, Bluetooth, GSM, CDMA); низкая стоимость готового решения.

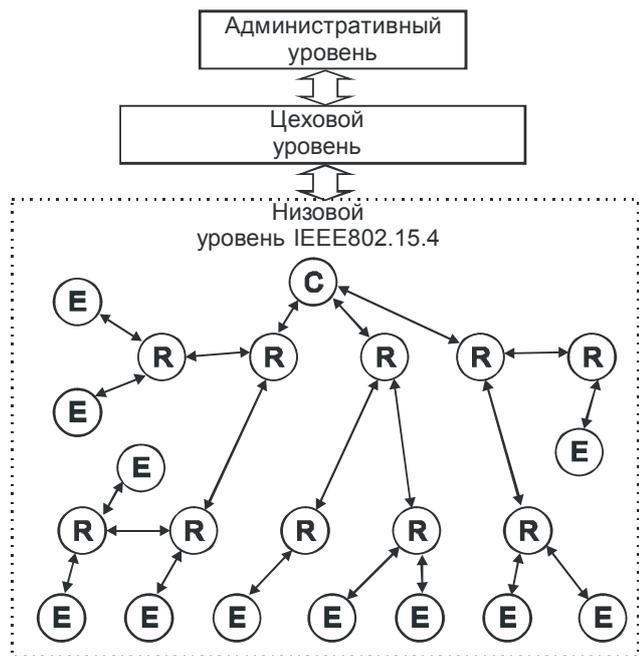


Рис. 9. Структурная схема архитектуры интегрированной промышленной сети мониторинга процессов литейного производства (R – ретранслятор, С – координатор, E – конечное устройство)

Построение абонентских систем на объектах мониторинга литейного производства

Абонентская система мониторинга параметров технологического процесса литейного производства должна состоять из таких функциональных блоков: измерения, цифровой обработки, коммуникационно-го и бесперебойного питания (рис. 10) [6].

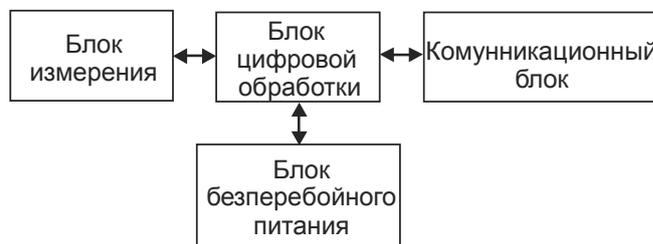


Рис. 10. Структурная схема архитектуры абонентской системы

Абонентскую систему предлагается реализовать на базе микроконтролера JN5139 (рис. 11).

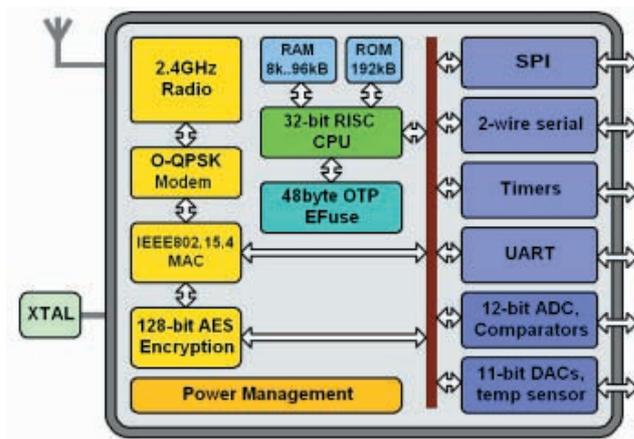


Рис. 11. Структурная схема архитектуры абонентской системы на базе микроконтролера JN5139

JN5139-xxx-Myy – это линейка SMD-модулей, позволяющая пользователю создать IEEE802.15.4 или ZigBee-совместимую систему за минимальное время и по минимальной цене. Благодаря данным модулям нет необходимости в дорогостоящей и продолжительной разработке дизайна платы и проведении набора тестов. В модулях реализовано взаимодействие с беспроводным микроконтролером Jennic JN5139, что позволяет получить комплексное высокопроизводительное решение. Для ввода в строй беспроводного контрольно-измерительного продукта нужно лишь подсоединить источник питания и периферийные устройства (переключатели, приводы, датчики).

Существует 5 вариантов исполнения аппаратной части модулей: JN5139-xxx-M00 имеет встроенную антенну, JN5139-xxx-M01/M03 – антенный коннектор, а JN5139-xxx-M02/M04 – усилитель мощности и МШУ для обеспечения большой дальности связи. В каждый из вариантов модулей может быть

предварительно запрограммирован сетевой протокол ZigBee (JN5139-Z01-Myy).

Особенности модуля JN5139-Z01: совместимость с 2.4 ГГц IEEE802.15.4 и ZigBee; рабочее напряжение – 2,7-3,6 В; ток потребления в спящем режиме (при активном таймере сна) – 2,8 мкА.

JN5139-xxx-M00/01/03: дальность связи – до 1 км (с внешней антенной); чувствительность приемника -96,5 дБм; выходная мощность передатчика +2,5 дБм; ток потребления в режиме TX (передача) < 37 мА; ток потребления в режиме RX (прием) < 37 мА.

Особенности микроконтролера: 32-битный RISC-процессор с тактовой частотой 16 МГц (в режиме удвоенной частоты – 32 МГц); 96 кБ RAM, 192 кБ ROM; АЦП: четыре входа, 12 разрядов; два 11-разрядных ЦАП, два компаратора, два программируемых таймера/счетчика, датчик температуры; два интерфейса UART (один – для внутрисхемной отладки); интерфейс SPI; двухпроводной последовательный интерфейс; 21 порт ввода/вывода.

Система не нуждается в радиочастотных тестах, модули совместимы с FCC part 15, ETSI ETS 300-328 и Japan ARIB STD-T66, возможность предварительного программирования модулей.

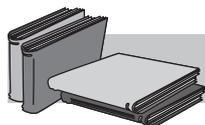
Преимущества применения модулей: надежные и безопасные беспроводные системы с низким энергопотреблением, сети датчиков на основе беспроводных компонентов, промышленная и домаш-

няя автоматика и управление, системы телеметрии и мониторинга. Промышленный температурный диапазон от -20 до +70 °С.

Выводы

Литейное производство требует интеграции и взаимодействия всех автоматизированных систем контроля и управления качеством производства. Большая роль в организации контроля качества производства принадлежит сетевым объектным системам, осуществляющим ввод, фильтрацию, сжатие, защиту данных и помехоустойчивое кодирование пакетов информации. Для эффективного контроля и управления качеством литейного производства необходимо организовать сбор, обработку и передачу на верхние уровни интегрированной сети технологических и измерительных данных, являющихся информационными образами текущих технологических процессов.

Системы быстрого прототипирования и SCADA-системы, организованные на базе беспроводных компьютерных сетей типа IEEE802.15.4, – перспективные технологии развития современного высокоэффективного литейного производства. Для оценки входных и выходных потоков данных на объектных системах компьютерных сетей контроля качества производства предложена структура трехуровневой интегрированной компьютерной сети, построенная на базе беспроводных каналов связи.



ЛИТЕРАТУРА

1. Информационная технология оперативного дистанционного мониторинга состояний объектов литейного производства / О. И. Шинский, Б. М. Шевчук, В. П. Кравченко, И. О. Шинский // Процессы литья. – 2007. – № 1-2. – С. 117-125.
2. Лисецкий Ю. М., Бобров А. Н. Пример построения корпоративной интегрированной информационной системы // УСиМ. – 2007. – № 6. – С. 9-16.
3. Шевчук Б. М. Методи визначення та відображення показників інформаційних станів об'єктів тривалого моніторингу // Комп'ютерні засоби, мережі та системи. – 2005. – № 4. – С. 78-85.
4. Лисецкий Ю. М., Бобров С. Н., Бобров А. Н. Национальная сеть беспроводного доступа в интернет // УСиМ. – 2007. – № 5. – С. 81-85.
5. <http://www.wireless-e.ru/articles/bluetooth.php>
6. <http://www.jennic.com/support/ieee802154/>
7. <http://www.plcsystems.ru/article/>
8. www.cad.dp.ua
9. www.rulen.ru/

Анотація

Шинський О. Й., Круцкевич Н. Д., Шевчук Б. М.

Побудова інтегрованої комп'ютерної мережі дистанційного моніторингу параметрів технологічних процесів ливарного виробництва

Розглянуто питання побудови інтегрованої комп'ютерної мережі дистанційного моніторингу параметрів технологічних процесів ливарного виробництва з використанням SCADA-систем та безпроводних локальних мереж. Запропоновано підходи організації мереж збору моніторингових даних та їх передачі, обробці, візуалізації.

Ключові слова

ливарне виробництво, сенсорні мережі, абонентські системи, бездротові мережі

Described problems of building an integrated computer network for remote monitoring of parameters of technological processes of casting production with the use of SCADA-systems and wireless local area networks, the approaches proposed networking of monitoring data collection and transmission, processing, visualization.

Поступила 16.11.09.

УДК 621.771: 621.74.04

М. Е. Докторов

Улучшение качества гнутых профилей проката

Определено, что основными причинами продольного изгиба, разноположности винтообразного скручивания и других дефектов гнутых профилей являются одновременная встреча с валками контактируемых участков заготовки и начало их подгибки. Для устранения этих недостатков, в том числе применительно к сложному поштучному процессу профилирования несимметричных профилей и с гофрами на стенках, предложены конструкции валков, в рабочих ручьях которых выполнены дополнительные конусные элементы.

Ключевые слова: гнутый профиль проката, заготовка, профилирование, валки, калибр, ручей, конусный элемент валка, качество, дефекты, винтообразное скручивание, центрирование, одновременность формообразования

При изготовлении гнутых профилей в валках на многоклетевых станах, в большей степени при поштучном процессе, наблюдается поперечное смещение формуемой заготовки в валках с оси профилирования, винтообразное кручение, продольный изгиб, забоины, переформовка и нестабильность основных размеров профиля по длине. Это обуславливается, главным образом, неодновременностью начала контакта заготовки с валками, неуравновешенностью прикладываемых для подгибки периферийных и формообразуемых на центральном участке элементов профиля сил и ненадежной фиксации движущейся заготовки от поперечного смещения в рабочем ручье валка. Технологические приемы и способы формовки, в которых уравнивают изгибающие моменты, создаваемые для подгибки периферийных участков, и применяют цилиндрические направляющие бурты для закрытия рабочих ручьев по ширине, как правило, лишь частично обеспечивают положительные результаты при непрерывном профилировании из рулонной заготовки. При поштучном процессе, который в начале и конце формовки каждой заготовки протекает неустойчиво, их применение не обеспечивает требуемого качества и устранения названных дефектов. Наблюдается также поперечное смещение профилей в 4-валковых калибрах и направляющих вертикальных роликах [1].

Установлено, что возможность поперечного смещения формуемой заготовки при ее задаче в валки обусловлена удалением кромок подгибаемых полок

от направляющих торцевых плоскостей цилиндрических буртов и зазором δ между ними в плоскости калибра. В соответствии со схемой (рис. 1, а) расстояние от осевой плоскости валков (плоскости калибра) до точки А (встречи кромки заготовки с конусной рабочей поверхностью охватывающего валка) рассчитывается по формуле

$$z = \{(0,5D_{кр})^2 - [0,5D_{он} + b \sin \alpha_{c(n-1)}]^2\}^{1/2}, \quad (1)$$

где $D_{кр}$ – диаметр окружности большего основания конусного участка валка, содержащей точку А встречи с кромкой полки профиля; $D_{он}$ – основной диаметр валка; $b = b_n + R_n \operatorname{tg} 0,5\alpha_{c(n-1)}$ – ширина полки; b_n – ширина прямолинейного участка полки; R_n – наружный радиус кривизны места изгиба; $\alpha_{c(n-1)}$ – суммарный угол подгибки полки в предшествующем $(n-1)$ переходе.

В свою очередь, из очевидных геометрических соотношений

$$D_{кр} = D_{он} + 2b \cos \alpha_{c(n-1)} \operatorname{tg} \alpha_{cn}; \quad h_{(n-1)} = b \sin \alpha_{c(n-1)}. \quad (2)$$

Здесь $\alpha_{cn} = \alpha_{c(n-1)} + \Delta\alpha_n$ – суммарный угол подгибки в калибре n -го рассматриваемого перехода; $\Delta\alpha_n$ – угол подгибки за проход; $h_{(n-1)}$ – высота профиля после предшествующего перехода.

После внесения (2) в (1), учета, что $b \cos \alpha_{c(n-1)} = b \sin \alpha_{c(n-1)} / \operatorname{tg} \alpha_{c(n-1)} = h_{(n-1)} / \operatorname{tg} \alpha_{c(n-1)}$, и несложных преобразований получим

$$z = \{D_{он} + h_{(n-1)} [(\operatorname{tg} \alpha_{cn} / \operatorname{tg} \alpha_{c(n-1)}) + 1]\} \times \\ \times h_{(n-1)} [(\operatorname{tg} \alpha_{cn} / \operatorname{tg} \alpha_{c(n-1)}) - 1]^{1/2}. \quad (3)$$

Из (1) и (3) видно, что с увеличением ширины под-