

УДК 621.369.029.64:669

**О.Н.Кукушкин, В.И.Головко, Н.В.Михайловский, А.А.Верховская,
В.П.Радченко**

РАДИОЛОКАЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ ПРОЦЕССОВ В ДОМЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Национальная металлургическая академия Украины

Приведены результаты промышленного внедрения радаров в металлургии. Полученные результаты позволили сделать вывод о целесообразности использования их в качестве основного компонента для реализации непрерывного контроля и управления.

В последней четверти XX века наблюдалось бурное развитие вычислительной и микропроцессорной техники, что, однако, не вызвало существенного прогресса в автоматизации технологических процессов. Практическое применение эта новая техника нашла в вооружениях, в автоматизации бизнес-процессов и в быту. Между тем, системы АСУ ТП, даже разрабатываемые на новейшей технической базе, по существу не решали новых технологических задач, во всяком случае, в металлургии, несмотря на общеизвестную их актуальность и технико-экономическую эффективность. Застой в АСУ металлургическими процессами вызван отсутствием новых средств контроля технологических процессов. Эта задача весьма сложна из-за жестких условий эксплуатации этих средств на металлургических объектах, больших расходов на разработку и доводку новой техники перед постановкой ее на производство и медленной окупаемости вследствие малого объема потребления приборов.

Выход из этой проблемной ситуации появился с началом конверсии оборонной промышленности. На международный рынок стали поступать, в частности, радиолокационные дальномеры ближнего действия (до 50 м) производства шведских, германских, американских и др. фирм. В СССР этот сегмент рынка с 1987 г. занимает продукция НПО «Исток» (г.Фрязино, Россия) - радиолокационные уровнемеры РДУ-Х1, РДУ-Х2 и измерители скорости РИС.

Суть микроволновых методов заключается в следующем. В качестве зондирующего сигнала используются сверхвысокочастотные радиоволны длиной 5...30 мм, излучаемые непрерывно. Приемо-передатчик с антенной конструктивно объединены в единый модуль с максимальным габаритом 300 мм вместе с системой обработки и передачи сигналов по кабелю. Мощность МКВ-излучения не превышает 50 мВт, что вполне безопасно для человека. Амплитуда МКВ-излучения постоянна, а его частота периодически изменяется по линейному закону в диапазоне нескольких сотен мегагерц. В приемнике сравниваются частоты излученного и отраженного от зондируемой поверхности радиосигналов, а разностная (низкая) частота, пропорциональная дальности до цели, используется в каче-

стве информативного параметра. Радиолокатор, основанный на этом принципе, является радиодальномером ближнего действия. В отличие от широко известных импульсных радиодальномеров дальнего действия, он позволяет измерять малые дальности (1...30 м) с высокой точностью и обеспечивает меньшую чувствительность к помехам из-за отражений и переотражений радиолуча от металлоконструкций и технологического оборудования. Другим информативным параметром отраженного сигнала является амплитуда (или мощность), которая обратно пропорциональна квадрату дальности и зависит от рельефа поверхности цели и ее электрофизических характеристик.

Наиболее полная информация о свойствах отражающей поверхности содержится в спектральной плотности мощности отраженного сигнала, и во многих случаях приходится анализировать не только положение максимума и величину уровня главной спектральной линии, но и форму всего спектра. Применяемая длина радиоволны (8 мм) существенно больше размеров пылевых частиц, что обеспечивает малый габарит антенны, а также минимальные рассеивание и затухание излучения в запыленных газовых средах, свойственных металлургическим агрегатам.

С 1987 г. над разработкой и применением в металлургии этих методов работает творческий коллектив сотрудников Института черной металлургии (с 1994 г. это коллектив лаборатории «Микроволновая техника для металлургии» при кафедре автоматизации производственных процессов НМетАУ) и ГНПО «Исток» (г. Фрязино, Россия).

Новейший образец радиодальномера РДУ-Х2, выпускаемый ГНПО «Исток», имеет следующие технические характеристики: диапазон измеряемых уровней 1 ... 20 м; максимальная погрешность измерений дальности не более $\pm 0,05$ м; излучаемая частота 37,5 ГГц; излучаемая мощность 20 мВт; угол раскрытия диаграммы направленности 6° ; диапазон выходного сигнала 0 - 5; 0 - 20; 4-20 мА пост.тока; потребляемая мощность 50 Вт; напряжение питания 220 В переменного тока; масса 7 кг.

Использование радиолокационного метода для определения уровня материалов потребовало предварительного изучения их отражательной способности. Основным показателем отражательной способности материала является коэффициент отражения – отношение мощностей отраженного и падающего на поверхность радиосигналов.

Результаты экспериментальных исследований отражательной способности различных металлургических сыпучих материалов и расплавов позволили сделать следующие выводы:

1. Коэффициенты отражения микроволнового излучения выбранного частотного диапазона материалами достаточно велики, что позволяет реализовать измерение их уровней в емкостях МКВ - средствами.

2. При отклонении радиолокационного дальномера от вертикальной плоскости наблюдается снижение амплитуды отраженного сигнала, вызванное его рассеянием.

3. Существенные различия коэффициентов отражения кокса, агломерата и окатышей, имеющих разные гранулометрический состав и форму поверхности, свидетельствуют о возможности определения вида сыпучих материалов МКВ-средствами.

Нами выполнен широкий спектр теоретических и экспериментальных исследований, лабораторных и промышленных, направленных на:

- поиск возможных областей применения микроволновой техники радиодальномеров и скаттерометров (измерителей ослабления радиоволн в различных средах);
- адаптацию универсального радара РДУ-Х2 к специфическим условиям применения:
 - выявление рациональных мест установки приборов на технологическом оборудовании;
 - защиту приборов от теплового излучения, выбросов пыли и газов;
 - передачу сигналов по линиям связи;
 - представление информации технологическому персоналу;
 - разработка способы обработки сигналов.

Последняя задача оказалась наиболее сложной и потребовала привлечения не только традиционного спектрального анализа, но и самого нового математического аппарата: вейвлет-анализа, нелинейной фильтрации, распознавания образов и др.

Мощный математический арсенал позволил решить ряд принципиально новых задач дистанционного контроля технологических процессов, для которых радиодальномеры изначально не предназначены.

Новые методики:

- Измерение макрорельефа (формы) засыпи сыпучих материалов.
- Измерение углов склонов засыпи.
- Распознавание вида компонентов шихты.
- Оценка крупности шихтовых компонентов на конвейере.
- Определение толщины слоя шихты на конвейере, аглоленте или грохоте.
- Зондирование шахты доменной печи для определения скорости схода шихты; толщины слоев руды и кокса, окружной неравномерности хода.
- Определение остаточной влажности наливной футеровки при сушке ковшей.
- Оценка состояния конверторной ванны при продувке (уровень и его колебания) и предупреждение о вероятных выбросах;
- Оценка изменения химсостава конверторного шлака при продувке.
- Оценка износа футеровки конвертора или ковша.

Наиболее продвинулись мы в основном применении радаров – измерении уровня шихтовых материалов и расплавов в металлургических агрегатах и сосудах. Даже в условиях кризиса 90-х годов на базе радаров РДУ-Х2 были разработаны и внедрены с участием ряда организаций и предприятий следующие системы:

- Система автоматического контроля уровня шихты в шахтной печи обжига известняка на металлургическом заводе им. Петровского (1993 г.).
- Система автоматического контроля уровня расплава при вакуумировании стали в ковше на Нижнеднепровском трубном заводе (1995 г.).

- Система автоматического контроля уровня конверторной ванны, в том числе при продувке, с прогнозированием вероятных выбросов расплава в 150-тонном конверторе на Челябинском метзаводе (1992 г.).

В связи с кризисом 90-х годов многие другие разработки лаборатории не были внедрены в производство, хотя успешно прошли опытно-промышленную проверку и были использованы УКРГИПРОМЕЗом в проектах реконструкции и строительства ряда доменных и сталеплавильных цехов.

Главный результат работы лаборатории – установлено, что микроволновые средства измерения в комплексе с микропроцессорными средствами обработки сигналов являются универсальным и надежным инструментом автоматического бесконтактного контроля многих металлургических процессов, они открывают новые горизонты в развитии АСУ ТП.

С 2002 г. лаборатория работает с меткомбинатом «Криворожсталь» в направлении решения задач автоматического контроля технологических процессов в доменном производстве. Существующая автоматическая система управления (АСУ) шихтоподачей ДП-9 на меткомбинате «Криворожсталь» охватывает круг задач, направленных на обеспечение заданного уровня засыпи, а также решает задачу коррекции доз шихтовых материалов с учетом их химического состава, влажности и точности набора предыдущей дозы. Однако, оперативный учет количества материалов в бункерах, уровня и формы их поверхности, с учетом образующихся углов откоса, не представляется возможным из-за отсутствия соответствующих измерительных средств.

Для получения достоверной информации об уровне (расстоянии) поверхности шихты в ее статическом и динамическом состоянии в приемных бункерах шихтоподачи наиболее предпочтительным является бесконтактный метод контроля. Поэтому установка радарных индикаторов уровня (РИУ) и дальнейшая их интеграция в АСУ обеспечивает решение целого ряда задач:

- обеспечения бесперебойной и ритмичной загрузки в доменную печь компонентов шихты в заданной последовательности и в установленном количестве;
- выполнения требований техники безопасности обслуживающим персоналом на передвижном реверсивном конвейере агломерата;
- бесконтактного непрерывного контроля заполнения и опорожнения приемных бункеров с материалами на основе реализации оперативного прогноза их расхода и управления запасами сырья;
- фиксации критических углов откоса для предотвращения аварийных ситуаций при загрузке шихтовых материалов.

В результате промышленных испытаний установлено, что технические характеристики РИУ типа РДУ-Х2 позволяют успешно использовать его в составе системы шихтоподачи в качестве стационарного средства оперативного контроля уровня шихты в приемных бункерах. Полученные при испытаниях данные об изменении уровня материала в бункере соответствуют технологическим представлениям. В 2003 г. при капитальном

ремонте ДП-9 на всех 14 приемных бункерах системы шихтоподачи были установлены по два радара, а информация от них поступает по кабельным линиям на пост управления участком.

Уверенное определение уровня является следствием формирования на поверхности материала элементарных отражателей (фасетов), размеры которых соизмеримы с длиной волны РИУ (8 мм). Генерация этими фасетами вторичного радиоизлучения формирует устойчивый сигнал отражения. Поскольку положение фасетов, находящихся в радиолуче случайно, в каждый момент времени осуществляется генерация вторичного излучения электромагнитной энергии с широкой диаграммой обратного рассеяния. В силу этих особенностей отражения электромагнитной энергии возможно определение расстояния до наклонных поверхностей сыпучего тела с весьма значительными углами откоса в пятне радиолуча. При малых углах откоса погрешность измерений дальности не превышает $\pm 0,03$ м.

Для оперативного прогноза теплового состояния печи, своевременной реализации обоснованных управляющих воздействий на ход доменного процесса и, вследствие этого, улучшения технико-экономических показателей работы доменной печи необходима информация об изменении уровня и формы поверхности засыпи шихтовых материалов по ходу плавки. Профиль поверхности шихтовых материалов на колошнике доменной печи возможно определять при сканировании радиолучом засыпи. Эта информация является основой для расчета скорости схода шихты, толщины ее слоев, рассогласования начальных профилей и окружной неравномерности засыпи. Исследованиями на агломерате, окатышах и коксе установлено, что уверенное определение профиля поверхности достигается с погрешностью измерения меньше допустимой (0,2 м) при угле падения радиолуча до 40° . Определение углов откоса сводится к поиску закономерности изменения поверхности, которая характеризует тенденцию формирования угла откоса с заданной технологом точностью.

С целью создания радиолокационного профилемера засыпи шихты на колошнике впервые проведены испытания радиолокационного дальнотера-уровнемера РДУ-Х2 на ДП-9 непрерывно в течение 6 месяцев в 2002-2003 гг. Основной задачей испытаний было определение надежности работы РДУ в условиях колошника ДП. РДУ был установлен на куполе печи на расстоянии 2,3 м от оси печи. Радиолуч был направлен к центру печи, что обеспечивало получение информации о глубине воронки засыпи шихты. Предполагаемый диапазон изменения уровня засыпи – от 0,5 до 6 м.

Для защиты РДУ от воздействия высокотемпературных (до 300°C) газопылевых потоков из рабочего пространства печи (избыточное давление до 0,18 МПа) было специально разработано и изготовлено устройство теплопылезащиты (УТПЗ). Охлаждение УТПЗ и отдув доменных газов осуществлялись азотом из цеховой магистрали (давление 0,55...0,6 МПа). Температура в полости между апертурой антенны РДУ и защитной пластиной непрерывно фиксировалась на самописце. Для обеспечения воз-

возможности отсечки УТПЗ от рабочего пространства печи с целью демонстража размещенного в нем РДУ использован шаровой кран.

Информация, поступающая от РДУ, передавалась на центральный пост управления по последовательному цифровому интерфейсу RS-485. Анализ сигнала РДУ показал, что уровень радиосигнала, отраженного от поверхности шихтовых материалов, на 15...25 дБ превышает уровень шумов в радиолокационном канале, что позволяет надежно определять положение засыпи на колошнике доменной печи. Сопоставлялись показания РДУ по центру печи и уровни засыпи на периферии, измеренного двумя штатными механическими зондами. Оба метода измерения зафиксировали согласованное опускание поверхности засыпи на периферии и в центре печи со средней скоростью схода около 3 мм/с. Полученные данные соответствуют существующим техно-логическим представлениям о ходе доменной плавки.

Основываясь на положительных результатах испытаний радара в реальных условиях эксплуатации, было принято решение о создании радиолокационного профилера с использованием радаров РДУ-Х2, стационарно установленных на куполе ДП-9. 20 радаров профилера зондируют поверхность засыпи в отдельных участках засыпи, информация от них по кабельным линиям поступает в ЦПУ, где в промышленном компьютере обрабатывается для представления техническому персоналу в удобной форме – в виде кривых в вертикальных сечениях колошника по двум перпендикулярным диаметрам, либо в виде линий уровня. Кроме формы засыпи, можно наблюдать информацию об эпохах скоростей схода шихты и о толщине слоев засыпи, образованных последовательными порциями шихты.

Радиолокационный профилер на ДП-9 был введен в эксплуатацию при капитальном ремонте в декабре 2003 г. и надежно работает, облегчая автоматизированное управление загрузкой и решение новых технологических задач. С использованием полученных результатов разработаны технологические и технические требования к применению радиолокационной техники на колошнике доменных печей меньшего объема с использованием 12-16 радаров, а также отработаны алгоритмы обработки радиолокационных сигналов в условиях мощных техногенных помех доменной плавки.

Сведения о докладчике:

Кукушкин Олег Николаевич, докт.техн.наук, профессор Национальной металлургической академии Украины;