

# Оптический измеритель скорости слитка машины непрерывного литья заготовок

Александр Аникин, Игорь Иерусалимов, Игорь Суковатин

В статье описан оптический измеритель перемещений горячего слитка для машин непрерывного литья заготовок. Измеритель предназначен для контроля положения и скорости горячего слитка при непрерывной разливке стали.

## ВВЕДЕНИЕ

Непрерывная разливка стали является одним из передовых технологических процессов в металлургическом производстве. Помимо автоматике, основная нагрузка при непрерывной разливке ложится на измерительную аппаратуру. От надежности контроля положения и скорости слитка напрямую зависит качество получаемой литой заготовки.

В машине непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), для слежения за перемещением слитка используют недорогие импульсные датчики. Самыми известными в металлургии оптическими приборами для измерения скорости проката являются лазерные доплеровские измерители скорости (ЛДИС). ЛДИС обеспечивают более высокую точность слежения за скоростью проката. Однако высокая стоимость заставляет применять их только в случае крайней необходимости.

Для решения большого круга измерительных задач в металлургии желательны некоторый промежуточный вари-

ант измерительной системы. С одной стороны, такая система должна обеспечивать точность измерений, сравнимую с ЛДИС, с другой, её стоимость должна быть невысокой. До недавнего времени не удавалось достичь желаемого компромисса между стоимостью и точностью. И только в последнее время, благодаря появлению производительных встраиваемых вычислительных устройств, появилась реальная возможность использовать в промышленности недорогие оптические измерители скорости и перемещения проката.

## СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ СЛИТКА МНЛЗ

Принцип работы разработанного оптического измерителя основан на регистрации изображения движущегося объекта. Схематично измеритель показан на рис. 1 и представляет собой оптическую камеру, в состав которой входят объектив, линейный матричный фотоприемник, блок электроники и встраиваемый промышленный компьютер.

С помощью объектива на линейном матричном фотоприемнике формируется изображение участка поверхности объекта. Это изображение преобразуется в сигнал, который считывается, оцифровывается и запоминается в памяти встроенного компьютера. Фактически эта часть функционирования измерителя аналогична работе современного цифрового фотоаппарата.

Сущность используемого для регистрации перемещения объекта метода состоит в следующем. Оптическая камера производит непрерывную и покадровую регистрацию участка поверхности объекта, который находится в поле зрения камеры. Каждый зарегистрированный и хранящийся в памяти компьютера кадр представляет собой массив, размер которого соответствует количеству пикселей линейной матрицы фотоприемников. Значение элемента массива соответствует амплитуде фотосигнала в соответствующем пикселе. Для обнаружения перемещения объекта необходимо сравнить два кадра, полученных оп-



Готовые заготовки МНЛЗ



Нижне-Тагильский металлургический комбинат

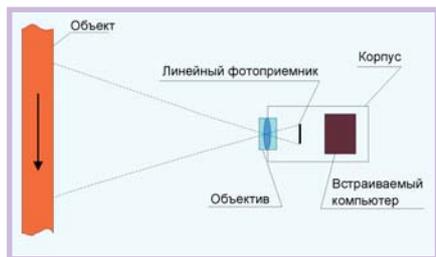


Рис. 1. Схема оптического измерителя

тической камерой через некоторый интервал времени. В случае, когда объект неподвижен, различие между двумя кадрами минимально. При перемещении объекта характерные участки текущего изображения будут смещены относительно предыдущего изображения. На рис. 2 приведены два последовательных кадра, полученных при перемещении объекта. Сравнивая их, можно обнаружить и рассчитать перемещение изображения объекта на фотолинейке.

Для сравнения кадров используются хорошо известные методы корреляционного анализа [1]. В первом кадре выбирается окно между пикселями  $I_0$  и  $I_2$  шириной  $T$ . Во втором кадре также выбирается окно ширины  $T$ , но смещенное относительно первого на величину  $n$ , его границы будут иметь значения  $I_0+n$  и  $I_2+n$ . По известным формулам рассчитывается зависимость коэффициента корреляции между двумя распределениями амплитуд пикселей в выбранных окнах двух кадров от параметра  $n$ . Взаимная корреляционная функция  $K(n)$  при ее реализации программными методами в цифровой аппаратуре используется в виде своего дискретного аналога.

$$K(n) = \frac{1}{(I_2 - I_0)} \sum_{i=I_0}^{i=I_2} (x_i - \bar{x}) \cdot (y_{i+n} - \bar{y}) \quad (1)$$

Здесь  $x_i$  и  $y_i$  — массивы амплитуд пикселей для 1-го и 2-го кадров соответственно,  $\bar{x}$  и  $\bar{y}$  — математические ожидания распределений  $x$  и  $y$  соответственно,  $I_0$  и  $I_2$  — границы интервала выборки,  $n$  — программное смещение. На рис. 3 показана зависимость функции  $K(n)$  для двух кадров, приведенных на рис. 2.

На рис. 3 можно видеть, что полученное межкадровое смещение составляет примерно 16 пикселей. Зная оптическое увеличение системы и расстояние до объекта, нетрудно получить реальное смещение объекта. В разработанном измерителе способ, примененный для определения перемещения объекта, также был использован для измерения расстояния до него. Фактически конструкция измерителя представляет собой цифровую оптическую стереокамеру. В

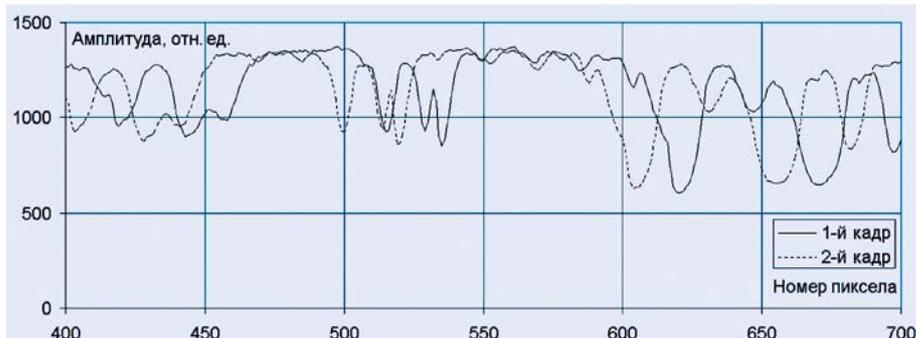


Рис. 2. Два кадра, полученных при перемещении объекта

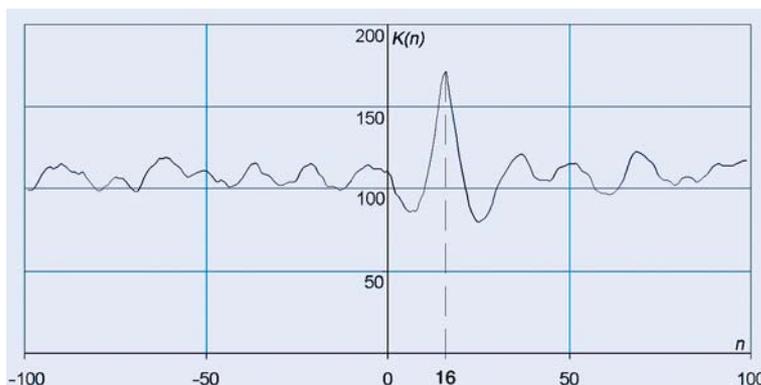


Рис. 3. Корреляционная функция для двух последовательных кадров

такой оптической системе изображение, полученное правым объективом камеры, сравнивают с изображением левого объектива. Расстояние до объекта получается с использованием известного метода триангуляции.

### КОНСТРУКЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ СЛИТКА МНЛЗ

Оптический измеритель предназначен для работы вблизи горячего слитка МНЛЗ. Температура слитка составляет 800...1200°C. Диапазон рабочих расстояний от слитка до оптического измерителя может составлять 1500...4000 мм. Небольшое расстояние до горячего слитка приводит к значительному нагреву конструкции оптического измерителя до 70°C. Если для оптической части измерителя такая степень нагрева вполне допустима, то для электроники это выдвигает серьезные требования по надежности.

К счастью, в настоящее время на рынке присутствует достаточный выбор фирм-производителей плат для жёстких условий эксплуатации. По размерам в наибольшей степени подошли платы в формате MicroPC. В качестве встроенного компьютера была выбрана процессорная плата 5066 фирмы Octagon Systems (США), а для АЦП использована плата параллельного аналогового ввода AI8S-5A-1 фирмы Fastwel (Россия). Эти платы работают в заданном для измерителя диапазоне температур от -20 до +70°C. На рис. 4 приведена схема компоновки оптического измерителя.

В качестве блока питания измерителя использован стандартный блок NAL25 фирмы Artesyn Technologies. Наличие на выходе NAL25 набора напряжений +5 В, -12 В и +12 В позволило обойтись одним блоком питания как для процессорной платы, так и для блока

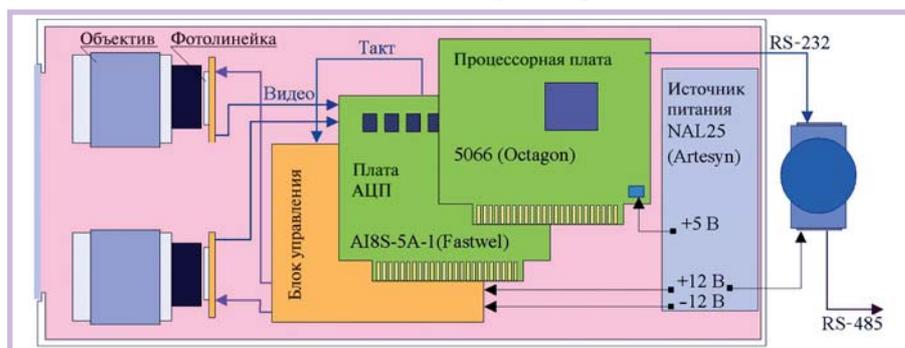


Рис. 4. Схема компоновки оптического измерителя перемещений слитка МНЛЗ

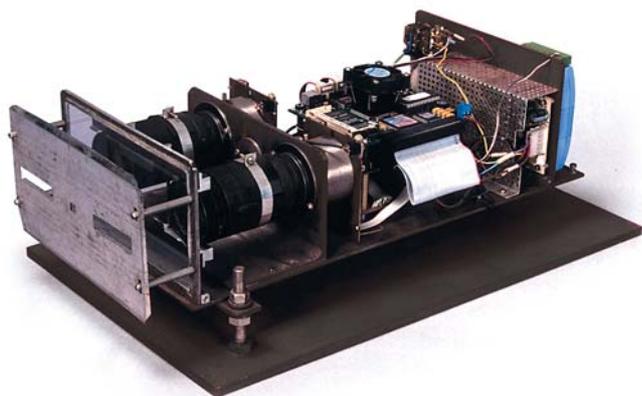


Рис. 5. Вид оптического измерителя со снятым кожухом

управления фотолинками. Следует отметить удобство использования для работы с несколькими фотолинками платы АЦП AI8S-5A-1 [2]. Благодаря параллельному вводу плата AI8S-5A-1 позволяет одновременно вводить видеокadres с нескольких фотолинек. Максимальные размеры плат АЦП и встраиваемого компьютера составляют 125 мм. Между собой они соединяются простым соединительным шлейфом. На рис. 5 приведен вид измерителя в открытом состоянии, он имеет компактные габариты и небольшой вес.

Оптическая часть измерителя состоит из двух объективов, образующих

оптическую стереопару. За объективами располагается плата АЦП и процессорная плата. К задней стенке измерителя непосредственно примыкает блок питания. На рис. 6 показано расположение измерителя.

Предварительная настройка и калибровка измерителя осуществлялись в лабораторных условиях. Для опытного экземпляра измерителя перемещений слитка МНЛЗ был установлен диапазон рабочих расстояний от 1750 мм до 2500 мм. Связь с измерителем осуществляется по двум последовательным портам RS-232 и RS-422.



Рис. 6. Расположение оптического измерителя на МНЛЗ

### РАЗМЕЩЕНИЕ И УСТАНОВКА ОПТИЧЕСКОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ НА МНЛЗ

Опытные испытания разработанного измерителя проводились на существующей МНЛЗ. Место установки измерителя было выбрано в районе машины газовой резки. Расстояние от кристаллизатора МНЛЗ до измерителя составляло примерно 25 метров по длине слитка. Рядом с измерителем расположена начальная позиция измерительного ролика существующей системы контроля положения слитка. Такое расположение позволило сравнивать длину отрезаемого слитка при использовании импульсного датчика ролика с длиной, полученной оптическим измерителем. На рис. 7 показана схема расположения измерителя на МНЛЗ.

При опытной эксплуатации основными контролируемыми параметрами были скорость слитка и длина отрезаемой заготовки. Проверить точность измерения можно, сравнивая последнее значение с реальной длиной отрезанной заготовки. Поэтому работа оптического измерителя строилась следующим образом. В компьютер, связанный с измерителем, вводился сигнал реза от существующей системы контроля. По этому сигналу в компьютере выделяется отрезанная длина, которая вычисляется как разница между текущим положением слитка и положением слитка в момент поступления предыдущего сигнала реза.

Скорость продвижения слитка, или скорость разливки, рассчитывалась как среднее перемещение слитка за выбранный интервал времени, при опытной эксплуатации брался интервал в 3 секунды. Все измеряемые параметры ежесекундно записывались в суточную базу данных.

Приведенная на рис. 7 схема показывает подключение нескольких измери-

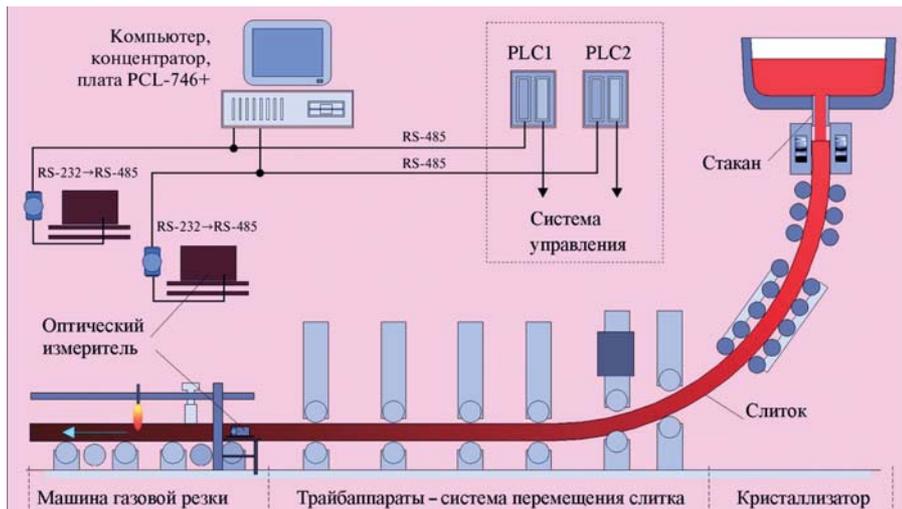


Рис. 7. Схема расположения оптического измерителя на МНЛЗ

телей к автоматике МНЛЗ. Информация о текущем положении слитка поступает непосредственно на контроллеры управления его порезкой. Компьютер-концентратор служит для архивирования технологических параметров движения слитка.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ

Основным параметром, по которому оценивалась точность оптического измерителя, являлась длина слитка. В процессе разлива измеритель непрерывно выдает текущую длину слитка, которая рассчитывается суммированием межкадрового перемещения слитка встроенным компьютером самого измерителя. Текущая длина хранится в измерителе и выдается по запросу извне по каналу связи. На рис. 8 показана типичная зависимость текущей длины слитка  $L$  от времени.

Начальная точка приведенной на рис. 8 зависимости отсчитывалась от момента включения измерителя. По наклону кривой можно судить о скорости разлива. Видно, что кривая на рис. 8 состоит примерно из трех участков. Первый участок от 15:00:00 до 15:24:00 — разливка с обычной скоростью. Второй участок от 15:24:00 до 15:30:00 — остановка слитка. Третий участок от 15:30:00 до 16:00:00 — также разливка с обычной скоростью. Технологическая скорость разлива получалась дифференцированием кривой  $L(t)$ . На рис. 9 показана полученная таким образом скорость разлива. Представленная зависимость скорости включает в себя временной интервал, во время которого производилась замена стакана первого ручья МНЛЗ.

Данная операция длится около 3 минут и характеризуется остановкой разливки. Эта ситуация и показана на рис. 8 в интервале времени от 15:24:00 до 15:28:00.

Для оценки точности измерителя использовалось сравнение реальных длин отрезанных заготовок с данными, полученными от измерителя. Погрешность при замерах горячих длин заготовок рулеткой составила около 5...10 мм. В табл. 1 приведены некоторые результаты замеров.

Таблица 1. Замеры горячих заготовок, квадрат

Номер заготовки	Длина по измерителю, мм	Длина по рулетке, мм	Разница между измерителем и рулеткой, мм
1	5442	5430	12
2	5440	5430	10
3	5438	5430	8
4	5422	5410	12
5	5439	5430	9
6	5442	5430	12

Приведенные в табл. 1 данные свидетельствуют о том, что точность определения длины отрезаемой заготовки по измерителю составляет около 0,2%.

В отличие от существующей системы измерений оптический измеритель позволяет получить дополнительную информацию о поперечном положении слитка относительно ручья МНЛЗ. Измеритель непрерывно производит определение расстояния до слитка, и по его изменению можно судить о боковых перемещениях слитка. На рис. 10 показано изменение расстояния  $D$  между измерителем и слитком за время наблюдения.

Приведенная на рис. 10 зависимость показывает, что боковой уход слитка во время разлива может составлять около 10 мм. Следует отметить, что измеритель

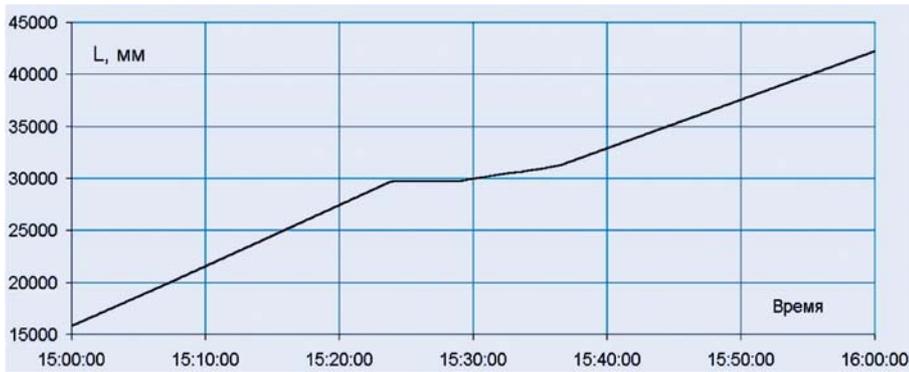


Рис. 8. Зависимость длины слитка L от времени

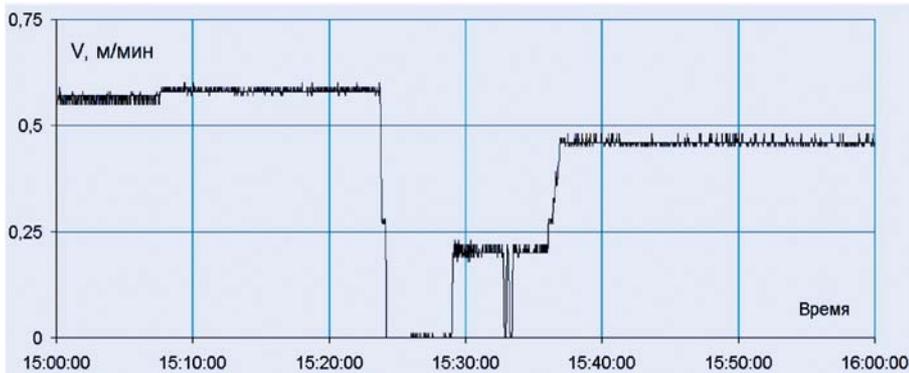


Рис. 9. Зависимость скорости разлива V от времени

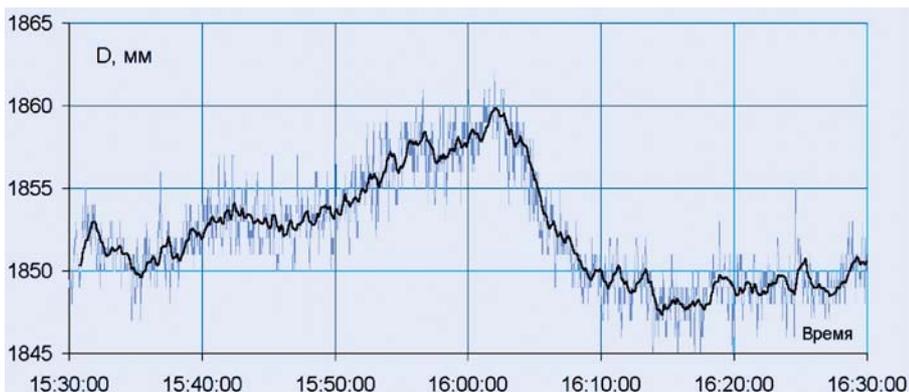


Рис. 10. Изменение поперечного положения слитка за время наблюдения

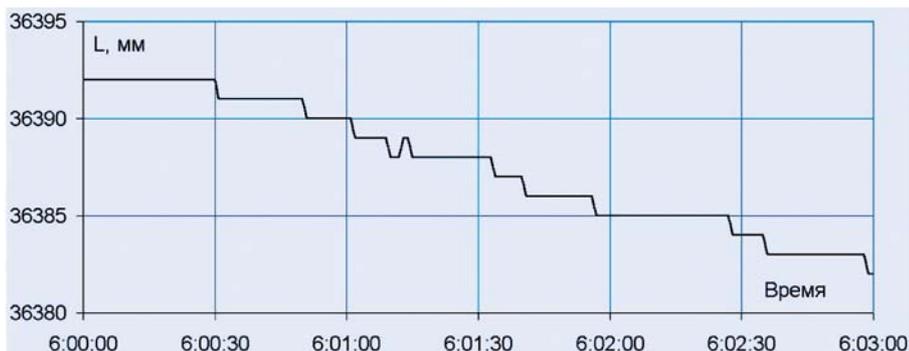


Рис. 11. Изменение длины слитка во время остановки разлива

производит определение расстояния до слитка с довольно высокой точностью, порядка 0,1%. На практике это может оказаться важным для постоянного контроля за механической частью МНЛЗ, обеспечивающей точную проводку слитка при разливе. С точки зрения

эксплуатации измерителя, его способность определять расстояние до слитка позволяет осуществлять быструю установку измерителя или его замену.

Хорошей иллюстрацией высоких возможностей измерителя по определению перемещения слитка является

обнаруженное во время остановки уменьшение длины слитка. На рис. 11 показано изменение длины слитка, зафиксированное измерителем в течение 3 минут. В этом интервале времени скорость разлива равнялась нулю.

Показанное на рис. 11 изменение длины слитка за время наблюдения объясняется его сокращением при уменьшении локальной температуры слитка. Видно, что в рассматриваемом интервале времени (3 минуты) длина слитка уменьшилась примерно на 10 мм. Теоретическая оценка показала соответствие расчетной и экспериментальной величин сокращения слитка.

Полученные в процессе опытной эксплуатации результаты показывают высокие возможности оптического измерителя. Его опытная эксплуатация продолжалась с перерывами в течение 9 месяцев, включая как летние, так и зимние месяцы. Температура окружающей среды колебалась в пределах от  $-10$  до  $60^{\circ}\text{C}$ . Температура корпуса измерителя доходила до  $70^{\circ}\text{C}$ . Измеритель эксплуатировался в условиях металлургического производства при соответствующем уровне вибраций и наводок от силовой части электрооборудования. За время эксплуатации не произошло ни одного сбоя измерителя и ни разу не было разрыва связи по информационному каналу. По результатам эксплуатации можно сделать вывод, что оптический измеритель представляет собой хорошую альтернативу существующим средствам контроля перемещения слитка МНЛЗ. При замене импульсных датчиков оптическими измерителями повышается как точность порезки слитка на МНЛЗ, так и точность слежения за его технологическими параметрами. Ожидаемый экономический эффект от внедрения системы составит около 700 тыс. руб. в год. ●

## ЛИТЕРАТУРА

1. Мелик-Шахназаров А.М., Маркатун М.Г. Цифровые измерительные системы корреляционного типа. — М.: Энергоатомиздат, 1985.
2. Кашин М., Корнеев К. Средства автоматизации, совместимые с продукцией фирмы Octagon Systems // Современные технологии автоматизации. — 1998. — № 4. — С.8.

**Авторы — сотрудники  
Нижнетагильского  
металлургического комбината  
Телефон: (3435) 29-2087, 29-2022**