

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОЧИСТОГО ЦИРКОНИЯ ИЗ ОТХОДОВ И ОБОРОТОВ ПРОИЗВОДСТВА В ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЕЧАХ СКБ-5025 И АППАРАТАХ Ц-40М

*С.А. Лавриков¹, М.Л. Коцарь¹, А.О. Лapidус¹, С.Г. Ахтонов²,
А.В. Александров², Л.В. Огородников², А.А. Чернышев², Н.В. Копысов²*

¹*ОАО «Ведущий научно-исследовательский институт химической технологии»,
Москва, Россия*

E-mail: kotsar@vniiht.ru;

²*ОАО «Чепецкий механический завод», Глазов, Россия*

E-mail: post@chmz.net

Недостатком процесса йодидного рафинирования циркония в промышленных печах при переработке отходов и оборотов производства в ОАО ЧМЗ является низкий прямой выход металла в йодидный пруток и большая энергоёмкость процесса. Целью данной работы является оптимизация процесса путём автоматизированного управления. Рассмотрены вопросы создания опытного стенда для автоматизации процесса йодидного рафинирования циркония в ОАО ЧМЗ. Описаны основные его функции, представлены аппаратная и программная части автоматизированного стенда, а также результаты его работы за время эксплуатации. Предложена и реализована в 2012 г. схема автоматизации работы 10 печей СКБ-5025 путём оптимизации общей стоимости вычислительного оборудования и доработки программного обеспечения.

Способ йодидного рафинирования позволяет получать наиболее чистый цирконий в промышленных условиях [1]. Высокоочищенный цирконий, полученный методом йодидного рафинирования, используют в качестве компонента шихты при выплавке сплавов реакторного назначения [2].

В настоящее время в ОАО ЧМЗ промышленные процессы йодидного рафинирования циркония проводят в аппаратах Ц-40М и печах СКБ-5025. В

таблице приведены данные по химическому составу йодидного циркония, полученного в этих аппаратах [1]. Из приведенных данных следует, что фактическое содержание суммы примесей в прутках циркония в ~ 2,7 раза ниже технических требований, а содержание индивидуальных примесей, как правило, соответствует пределам обнаружения их в используемых методиках.

Химический состав и коэффициенты очистки от примесей в процессе йодидного рафинирования циркония в аппарате Ц-40М в печи СКБ-5025

Элемент	Йодидное рафинирование циркония в аппарате Ц-40М			Цирконий йодидный, ТУ95.46-97
	Стружка из брикетов спечённого электролитического порошка	Цирконий йодидный	К _{оч}	
	Массовая доля примесей, %			Не более
1	2	3	4	5
Азот	0,0045	<0,002	>2,2	0,005
Алюминий	0,0011	0,001	1	0,005
Бериллий	<0,003	0,0003	–	0,001
Бор	0,000042	<0,00003	>1,4	0,00005
Гафний	0,034	0,03	1	0,05
Железо	0,0081	0,004	2	0,03
Кадмий	–	0,00003	–	0,00005
Кальций	0,0036	0,00032	11	0,02
Кислород	0,056	0,007	8	0,05
Кремний	0,004	0,002	2	0,008
Литий	–	0,0001	–	0,0002
Марганец	0,0003	0,0003	1	0,001
Медь	0,0003	0,0003	1	0,003
Молибден	–	0,003	–	0,005
Никель	0,003	0,004	0,75	0,01
Ниобий	–	<0,006	–	0,01
Олово	–	0,0013	–	0,05
Свинец	<0,003	0,003	–	0,005
Титан	<0,003	0,002	–	0,005

1	2	3	4	5
Углерод	0,0046	0,003	1,3	0,008
Хром	0,0032	<0,003	1	0,02
Число опред. примесей	16	21	–	21
Сумма примесей	<0,1317	<0,0644	2,7	≤0,2863

Главными недостатками данного процесса являются низкий (~28%) прямой выход металла в йодидный пруток и большая энергоёмкость. Кроме того, следует заметить, что сам процесс образования летучих соединений циркония и их термодиссоциации на раскаленной проволоке в металлическом аппарате Ц-40М является не до конца изученным, что не позволяет однозначно определять температурный режим по ходу процесса для обеспечения максимальной скорости осаждения циркония.

С целью оптимизации процесса йодидного рафинирования циркония и повышения съёма циркония с аппарата в ОАО ЧМЗ на базе одной из печей СКБ-5025 был создан автоматизированный опытный стенд [5], в функции которого входило:

- изучение возможности проведения цикла работы аппарата в автоматическом режиме без участия персонала для исключения человеческого фактора при проведении процесса;
- отработка методов оптимального управления процессом йодидного рафинирования циркония в аппарате Ц-40М в печи СКБ-5025;
- принятие решения о его тиражировании на аналогичные печи отделения цеха, общее количество которых достигает нескольких десятков.

Процесс йодидного рафинирования циркония используют в промышленном масштабе уже более 50 лет, и за это время неоднократно предпринимались попытки его полной автоматизации, однако они не принесли должного эффекта по разным причинам, поэтому и ограничились созданием локальных средств автоматики.

С точки зрения системы управления аппаратом Ц-40М в печи СКБ-5025, можно выделить два контура, так или иначе направленные на регулирование температуры нити, электрическое сопротивление которой по мере осаждения циркония вследствие роста диаметра прутка постоянно уменьшается [3, 4]:

- управление тиристорным регулятором напряжения (РНТО) по заданной вольт-амперной характеристике;
- управление заслонками (шиберами) ДУ-150, ДУ-500 и вентилятором в системе воздушного охлаждения аппарата по показаниям датчиков температуры, расположенных в различных частях печи СКБ-5025 (рис. 1).

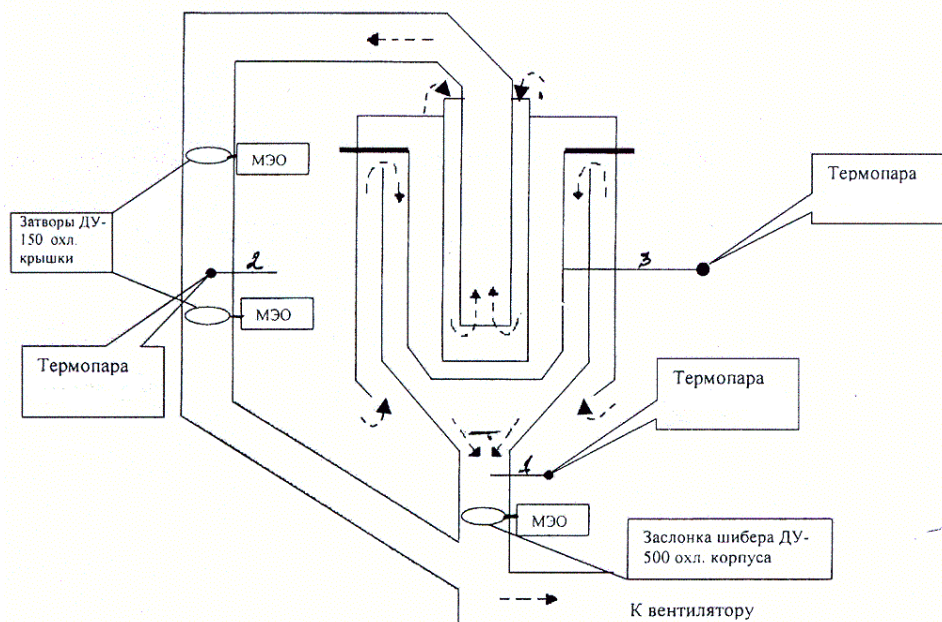


Рис. 1. Схема воздушного охлаждения аппарата Ц-40М в печи СКБ-5025 испытательного стенда

Первый контур основан на периодическом сравнении действующих значений напряжения на концах нити и тока через нить, регулировании напряжения в соответствии с заданной в регламенте вольт-амперной характеристикой и переключении ступеней трансформатора. Контур управляется

оператором смены с частотой один раз в час с помощью показаний стрелочных приборов вольтметра и амперметра.

Второй контур предполагает включение–выключение вентилятора и регулирование углов поворота заслонок в системе воздушного

охлаждения аппарата Ц-40М в печи СКБ-5025. Он также управляется оператором смены с частотой один раз в час в соответствии с регламентом. Кроме того используются средства локальной автоматики на базе приборов КСП-3 для регистрации данных и управления системой воздушного охлаждения аппарата по отдельным термопарам.

При выборе комплекса технических средств (КТС) и программного обеспечения (ПО) автоматизированного опытного стенда учитывали ряд факторов, по которым выбор был сделан в пользу оборудования CompactRIO от фирмы National Instruments, США, и её графического ПО LabView [6-8]. К этим факторам относились: возможность реконфигурирования измерительных и

управляющих трактов системы; удобная графическая среда разработки ПО с большим количеством встроенных функций и библиотек для организации обмена и анализа данных, предназначенная для инженеров и исследователей, не являющихся специалистами в области разработки ПО. Учитывали также многолетний опыт работы с аппаратно-программными средами LabView в ОАО ЧМЗ.

КТС для автоматизации стенда имеет архитектуру, основанную на использовании контроллера реального времени для печи СКБ-5025 и концепции реконфигурируемого ввода-вывода. На рис. 2 представлена блок-схема КТС для одной печи СКБ-5025.

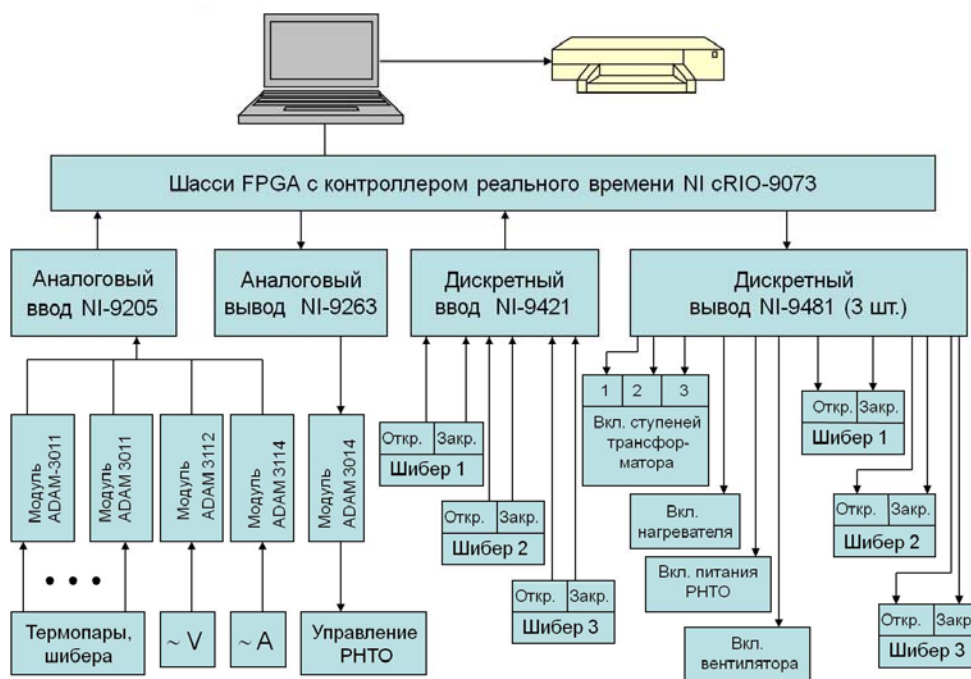


Рис. 2. Обобщенная блок-схема сопряжения КТС с датчиками и исполнительными устройствами для одной печи СКБ-5025

Оборудование от NI расположено в шкафу в одном компактном крейте. Датчики и исполнительные механизмы подключены напрямую или через согласующие модули серии ADAM фирмы Advantech, широко известного поставщика оборудования в области измерительных и управляющих систем (рис. 3). Промышленный компьютер фирмы Advantech расположен вблизи печи и шкафа.

Аналоговые сигналы напряжения ($\sim U$) и тока ($\sim A$) имеют близкую к синусоидальной форму сигнала с частотой ~ 50 Гц, что является следствием применения РТНО для управления мощностью на нити аппарата Ц-40М. На модуль аналогового ввода поступают как действующие значения напряжения и тока, так и мгновенные значения для отслеживания формы сигналов и вычисления по ним действующих значений для сравнения с их входными аналогами. Период между соседними выборками для отслеживания формы сигналов составляет 84 мкс. Минимальное время между замерами может составлять 0,2 с.



Рис. 3. Оборудование КТС, расположенное в шкафу стенда

Сигналы с термопар представляют собой медленно меняющиеся во времени аналоговые сигналы, измерение которых производится с той же частотой дискретизации, что для напряжения и тока, но с дальнейшим усреднением измеренных величин. Сигналы углов поворота отражают положение

шиберов ДУ-500 и ДУ-150 в системе воздушного охлаждения аппарата Ц-40М, угол открытия которых меняется от 0 (шибер закрыт) до 90 градусов (шибер открыт). Управление РНТО производится аналоговым сигналом, который изменяет фазовый угол открытия силовых тиристорных регулятора РНТО. Сигнал на управление РНТО подается при выходе измеренных значений напряжения и тока за пределы нижней и верхней граници вольт-амперной характеристики процесса йодидного рафинирования циркония.

Модуль дискретного ввода используется для считывания так называемых «конечников» исполнительных механизмов шиберов, сигнализирующих о полном открытии или полном закрытии шиберов, а также для считывания аварийного сигнала от РНТО.

Для управления исполнительными механизмами МЭО шиберов используют по два реле на каждый механизм в составе модулей дискретного вывода. Одно реле – на запуск механизма увеличения угла поворота шибера, другое – на уменьшение. Остальные релейные выходы модулей дискретного вывода предназначены для выбора ступени трансформатора (1, 2 или 3), включения (выключения) питания РНТО, нагревателя и вентилятора.

Компьютер связан с контроллером реального времени последовательным интерфейсом Ethernet со стандартным протоколом TCP/IP. Контроллер подключён к реконфигурируемому шасси через внутреннюю шину Internal PCI Bus. В шасси находится главный компонент системы – микросхема FPGA, позволяющая настроить функциональность всех перечисленных выше модулей ввода-вывода.

Программное обеспечение опытного стенда разработано для всех трёх уровней системы и состоит из программы компьютера (Host.vi), контроллера (RT.vi) и реконфигурируемого шасси (FPGA.vi) [6] применительно к выбранной среде разработки ПО LabView.

Программы контроллера и шасси обеспечивают автономную работу контроллера по сбору данных и выдаче управляющих воздействий на исполнительные механизмы стенда и являются программами, в меньшей степени требующими модификации или корректировки. Управление процессом в аппарате и все расчёты производятся на уровне компьютера верхнего уровня системы.

Основными функциями программы компьютера при проведении процесса являются:

- автоматическое регулирование подачи напряжения на нить в пределах заданной вольт-амперной характеристики;
- автоматическое регулирование положений шиберов в системе воздушного охлаждения аппарата Ц-40М в печи СКБ-5025;
- плавный сброс и плавная подача напряжения при смене ступени трансформатора РНТО;

- вычисление истинных значений параметров системы через калибровочные коэффициенты;
- реакция системы на кратковременные скачки тока на нити при касании прутками циркония стенки корпуса аппарата;
- отработка алгоритмов поиска оптимального температурного режима в системе воздушного охлаждения аппарата;
- регистрация данных и событий, происходящих во время процессов, в файлах в текстовом формате и формате Excel;
- автоматизация регламента проведения процесса, в котором действия оператора привязаны к конкретным значениям силы тока на нити циркония, позволяющая вести процесс без участия персонала по заранее составленной программе.

Таким образом, система функционирует только при работающем компьютере, что вполне допустимо в случае опытного стенда. Обмен данными с контроллером реального времени производится через сетевые переменные, определенные на уровне компьютера. Структура программы показана на рис. 4.

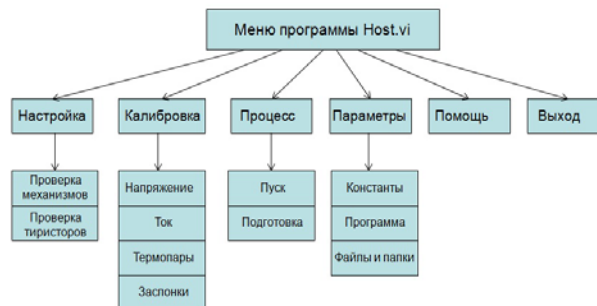


Рис. 4. Структура программы Host.vi

Как видно из рисунка, помимо основного пункта меню «Процесс–Пуск», программа содержит пункты выполнения и других вспомогательных операций: настройку; калибровку; тестирование и программирование действий оператора при достижении конкретных значений силы тока на нити циркония; настройку путей размещения файлов результатов измерений, а также событий, происходящих во время проведения процесса. Интерфейс оператора (лицевая панель по терминологии LabView) основного пункта меню программы для проведения процесса в аппарате Ц-40М представлен на рис. 5.

На рис. 6 приведен фрагмент блок-диаграммы программы компьютера в среде разработки LabView, представляющий собой графическое изображение всех элементов алгоритма работы программы. С точки зрения программирования этот фрагмент состоит из арифметических, логических и других элементов, соединенных между собой проводниками, по которым перемещаются данные. Это делает процесс программирования более наглядным и привлекательным для исследователей и разработчиков, для которых само программирование является только частью работы.

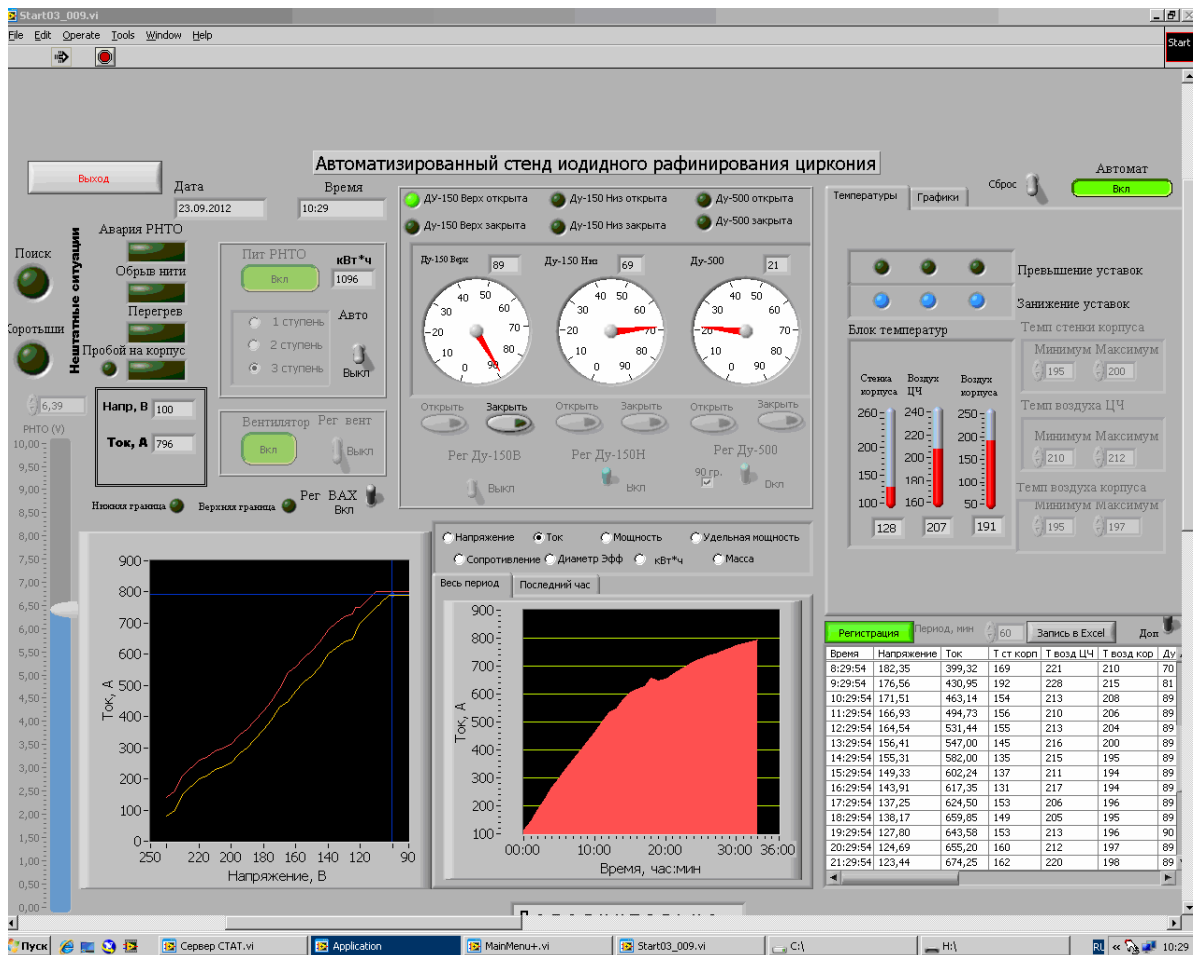


Рис. 5. Интерфейс оператора при проведении процесса на стенде

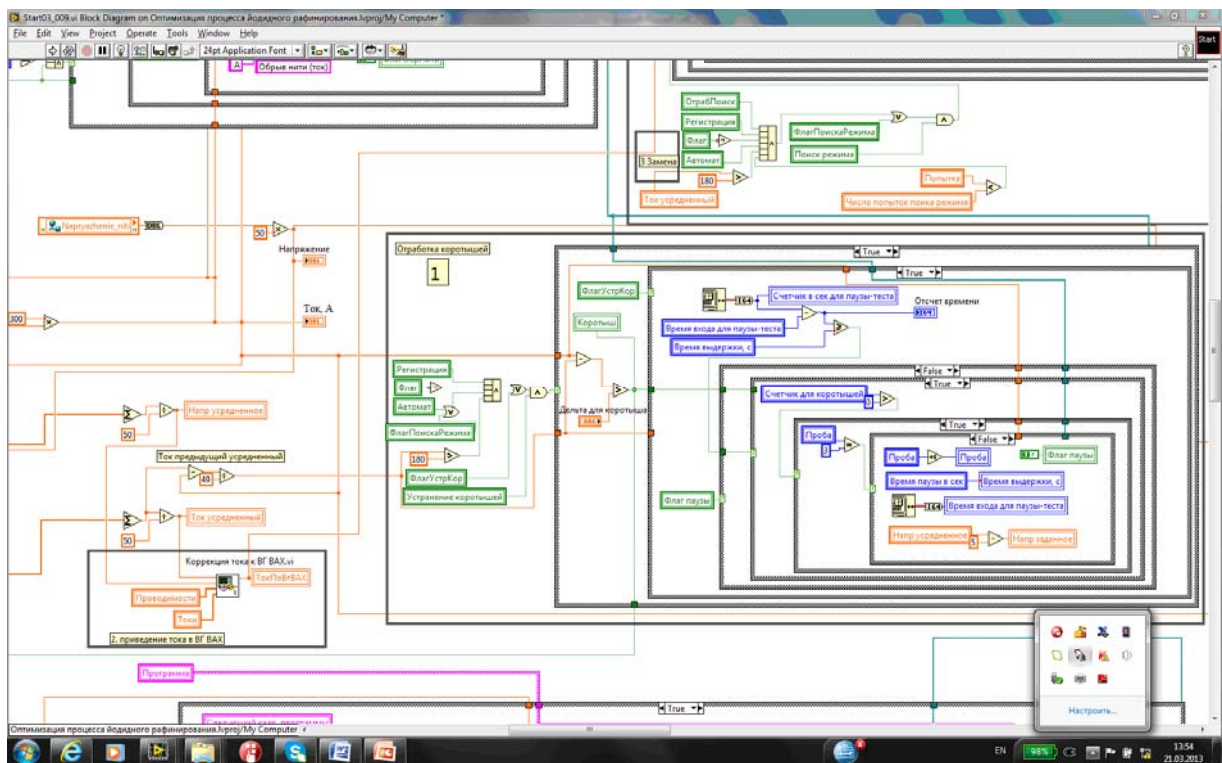


Рис. 6. Фрагмент блок-диаграммы программы интерфейса

Начиная с середины 2010 г. опытный стенд используется как для отработки решений по оптимальным режимам проведения процесса йодидного рафинирования циркония в аппарате Ц-40М, так и для выпуска готовой продукции. Основным критерием оптимального ведения процесса являлось превышение съёма циркония с аппарата по сравнению со среднестатистическим съёмом циркония со всех аппаратов. Оптимизации подлежали параметры автоматического регулирования подачи напряжения на нить циркония, воздействия на температурный режим в системе охлаждения аппарата при замедлении роста массы циркония на нити, а также способы реакции системы на скачки тока на нити при касании прутками циркония стенки корпуса аппарата, приводящие к остановке процесса или получению некондиционной продукции.

По результатам работы стенда съём йодидного циркония с аппарата превышает средний съём примерно на 10%. Пропорционально уменьшен расход электроэнергии и обеспечена плавность сброса и подачи электроэнергии при смене ступени трансформатора. Кроме того, уменьшено количество некондиционного продукта за счёт доведения до конца процессов при разворотах прутков циркония, приводящих к короткому замыканию на корпус и преждевременной остановке процесса.

Положительные результаты, полученные за время опытной эксплуатации автоматизированного стенда в цехе №60 ОАО ЧМЗ в течение года фактически беспереывной его работы, включающей в себя проведение более двухсот процессов, легли в основу предложений по переводу работы отделения йодидного рафинирования цеха №60 ОАО ЧМЗ на автоматическое управление процессом.

Очевидно, что простое тиражирование данного автоматизированного стенда на большее количество

печей СКБ-5025 (в отделении цеха находится несколько десятков печей СКБ-5025) нецелесообразно как с точки зрения общей стоимости системы, так и размещения большого количества компьютеров с мониторами. Поэтому было принято решение использовать один компьютер (компьютер мастера) для управления процессами на всех печах, связанный с соответствующими контроллерами реального времени последовательным интерфейсом Ethernet со стандартным протоколом TCP/IP. Дополнительно, в целях повышения надежности и устойчивости работы всей системы в целом, каждый контроллер был оснащен относительно недорогой операторской панелью MT6070iH фирмы Weintek Labs, Inc [9] с размером экрана 7".

Отсюда при создании системы, состоящей из 10 печей, были внесены изменения как в структуру КТС системы, так и в распределение задач и функций между компьютером и контроллерами реального времени для каждой печи СКБ-5025, позволяя последним самостоятельно провести процесс в аппарате.

1. КТС опытного стенда, взятый за основу для создания автоматизированной системы управления, выполнен на основе NI CompactRIO. Состав и назначение модулей NI CompactRIO для одной печи остались без изменения, однако схема их организации в системе, с точки зрения общей стоимости системы и размещения оборудования, приняла вид, представленный на рис. 7. На данной схеме контроллер реального времени NI cRIO-9073 с реконфигурируемым шасси 2M Gate FPGA и модулями ввода-вывода показан укрупнённо в виде одного блока, его состав и назначение модулей полностью соответствуют КТС опытного стенда (см. рис. 2).

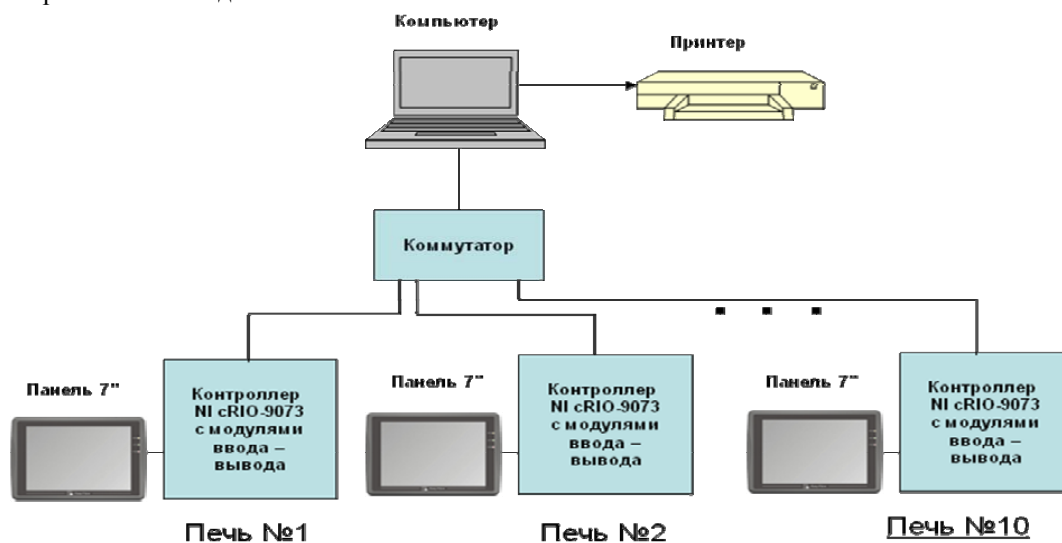


Рис. 7. Обобщенная схема сопряжения КТС автоматизированного управления процессом йодидного рафинирования циркония на десяти печах СКБ-5025

Каждый контроллер оснащен дополнительной панелью оператора MT6070iH, предназначенной для

запуска и мониторинга процесса непосредственно у печи и управления процессом (доведения процесса)

на данной печи в случае сбоя работы компьютера или самостоятельного ведения процесса. Панель подсоединена к контроллеру через последовательный порт RS-232 в составе последнего, обмен данными с контроллером реализован далее по протоколу Modbus [10].

Компьютер связан с контроллерами реального времени последовательным интерфейсом Ethernet со стандартным протоколом TCP/IP через стандартный коммутатор на заданное количество каналов.

2. Предложенная система автоматизации десяти печей СКБ-5025 предполагает модернизацию ПО опытного стенда для его адаптации на КТС. Для этой цели было перенесено выполнение алгоритмов регулирования с компьютера на контроллер, что позволило вести процесс без участия компьютера, и разработано ПО панели оператора по управлению процессом. Таким образом, реализовано два канала управления процессом в печи СКБ-5025: от компьютера и от панели оператора вблизи печи.

Кроме того, для компьютера разработаны файловая структура данных по процессам (журналы данных и событий во время процесса) и ряд

дополнительных программ. Это программа опроса контроллеров для сбора статистики и заполнения журналов и программа для мастера отделения, позволяющая контролировать ход процессов одновременно на всех печах и при необходимости вносить коррективы в ход процесса со своего компьютера.

На рис. 8 приведена лицевая панель мастера на компьютере для наблюдения за процессами. Показано, что процессы в данный момент времени ведутся на шести печах СКБ-5025, и управление производится от панелей оператора.

В настоящее время в ОАО ЧМЗ введены в эксплуатацию 10 печей СКБ-5025 с автоматизированным управлением. Процесс подключения печей производится силами ОАО ЧМЗ без нарушения общего ритма работы отделения цеха. В 2013 г. намечен ввод в эксплуатацию ещё 10 таких печей.

Авторы благодарят А.В. Андреева, В.А. Погадаева, В.Г. Моисеева, Н.А. Яговкина, Н.Г. Шаврина, В.С. Архангельского за участие в создании стенда и проведении экспериментов



Рис. 8. Лицевая панель мастера на компьютере для наблюдения за процессами

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. М.Л. Коцарь, О.Г. Моренко, М.Г. Штуца и др. Получение высокочистых титана, циркония и гафния методом йодидного рафинирования в промышленных условиях // *Неорганические материалы*. 2010, т. 46, №3, с. 332-340.

2. М.Л. Коцарь, С.А. Лавриков, В.И. Никонов и др. Высокочистые титан, цирконий и гафний в ядерной энергетике // *Атомная энергия*. 2011, т. 111, в. 2, с. 72-77.

3. Пат. 2261287 РФ, МПК С22В34/14, С22В9/10. Аппарат для йодидного рафинирования циркония / В.Г. Моисеев, О.Г. Моренко, В.А. Погадаев и др. // *Изобретения. Полезные модели*. 2005, №27, с. 377.

4. Пат. 2421530 РФ, МПК С22В34/14, С22В9/00. Способ управления процессом йодидного рафинирования циркония / А.В. Александров, В.Г. Моисеев, В.А. Погадаев и др. // *Изобретения. Полезные модели*. 2011, №17,

5. С.А. Лавриков, М.Л. Коцарь, С.Г. Ахтонов и др. Разработка опытного стенда для автоматизации

процесса йодидного рафинирования циркония на базе промышленной печи СКБ-5025 // *Цветные металлы*. 2013, №2, с. 82-87.

6. Е.Д. Баран. LabVIEW FPGA. *Реконструируемые измерительные и управляющие системы*. М.: ДМК Пресс, 2009.

7. Дж. Тревис, Дж. Кринг. *LabVIEW для всех*. М.: ДМК Пресс, 2010.

8. NI CompactRIO Control and Acquisition System. // <http://www.ni.com/f/products/2/2177/ru/>.

9. Сенсорная графическая панель Weintek MT6070iH: Спецификация // <http://www.weintek.com/global/Product/Product.aspx?Category=Detail&Uid=MT6070iH&T=HMI>

10. В.В. Денисенко. *Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием*. М.: «Горячая линия – Телеком», 2009.

Статья поступила в редакцию 30.08.2013 г.

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ОТРИМАННЯ ВИСОКОЧИСТОГО ЦИРКОНІУ З ВІДХОДІВ ТА ОБІГІВ ВИРОБНИЦТВА В ПРОМИСЛОВИХ ПЕЧАХ СКБ-5025 ТА АПАРАТАХ Ц-40М

С.А. Лавриков, М.Л. Коцарь, А.О. Лapidус, С.Г. Ахтонов, А.В. Александров, Л.В. Огородніков, О.А. Чернишов, Н.В. Кописов

Недоліком процесу йодидного рафінування цирконію в промислових печах при переробці відходів і обігів виробництва у ВАТ ЧМЗ є низький прямий вихід металу в йодидний пруток і велика енергоємність процесу. Метою даної роботи є оптимізація процесу шляхом автоматизованого управління. Розглянуто питання створення дослідного стенду для автоматизації процесу йодидного рафінування цирконію у ВАТ ЧМЗ. Описані основні його функції, представлені апаратна і програмна частини автоматизованого стенду, а також результати його роботи за час експлуатації. Запропонована і реалізована в 2012 р. схема автоматизації роботи 10 печей СКБ-5025 шляхом оптимізації загальної вартості обчислювального обладнання та доопрацювання програмного забезпечення.

AUTOMATING THE PRODUCTION OF HIGH-PURITY ZIRCONIUM FROM WASTE PRODUCTS IN INDUSTRIAL FURNACES SKB-5025 AND APPARATUSES TS-40M

S.A. Lavrikov, M.L. Kotsar, A.O. Lapidus, S.G. Akhtonov, A.V. Aleksandrov, L.V. Ogorodnikov, A.A. Chernyshev, N.V. Kopysov

A disadvantage of iodide refining of zirconium in industrial furnaces in the processing of waste products production in JSC CMP is the low direct yield of the metal in iodide rods and large energy consumption of the process. The aim of this work is to optimize the process by means of automated control. The paper deals with the creation of a test unit to automate the iodide refining of zirconium in JSC CMP. The main features of the unit, the hardware and software of the automated unit and the results of its work during the operation are described. A scheme for the automation of 10 furnaces SKB-5025 by optimizing the total cost of computing equipment and for software improvements was proposed and implemented in 2012.