Materiales de Construcción Vol. 19, nº 134
Abril, mayo, junio de 1969

616-125

la aplicación de sistemas de ordenadores de procesos para la automatización de la fabricación de cemento, principalmente de la preparación y mezcla de materias primas

K. SCHRODT
Dipl. Ing. AEG-TELEFUNKEN

En los últimos años se introdujo en las fábricas de cemento la vigilancia y control central con medios y métodos de la técnica convencional de medida, regulación y control. Mediante el empleo del instrumentaje habitual y de los instrumentos de medida especialmente proyectados, así como de los dispositivos de telemando, fue posible la observación y vigilancia del desarrollo del proceso desde un puesto de control central. Para enjuiciar las mediciones importantes para el desarrollo del proceso, se indican y registran en forma preferentemente analógica (registradora de puntos o de líneas); se señalan las situaciones de funcionamiento críticas.

Los circuitos simples de regulación con comportamiento favorable en el tiempo como, por ejemplo,

- presión en la cabeza del horno,
- presión del aire en el enfriador,
- caudal de paso de aire y gas, y
- dosificación de materias primas,

se dominan mediante reguladores convencionales.

Se presentan dificultades en los tramos de regulación con grandes tiempos muertos y de arranque.

Las medidas indicadas condujeron a mejoras en el proceso de producción, desde el punto de vista técnico y económico. En el proceso, sin embargo, están contenidas reservas para nuevas mejoras. La exigencia de la dirección de las empresas de producir la mayor cantidad posible de clínker de calidad constante y costes mínimos, puede conse-

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://materconstrucc.revistas.csic.es

guirse con la ayuda de una automatización progresiva. Una mejora y optimación de la marcha del proceso supone de antemano el que los datos del proceso sean asimilados y elaborados rápidamente, a fin de que sea posible, también, una rápida intervención en el proceso.

El progreso consecuente de la técnica actual consiste, por lo tanto, en la aplicación de ordenadores de procesos, mediante los cuales pueden establecerse, por primera vez, las bases para la solución de determinadas tareas.

Los ordenadores de procesos son instalaciones electrónicas para la elaboración de datos, programadas con memorias, y aplicadas para la comprensión de datos, vigilancia "on-line", control o regulación de procesos técnicos. On-line quiere decir, que los aparatos de medida y los elementos de ajuste están unidos directamente con el ordenador de procesos mediante conductores eléctricos, es decir, que hay un flujo directo de información entre ellos y el computador de procesos sin la intervención intermedia de hombres.

La figura 1 muestra la constitución principal de un ordenador de procesos.

El punto central del computador lo constituye un calculador digital libremente programable con sus cuatro elementos principales:

Dispositivo de memoria.

Dispositivo de cálculo.

Dispositivo de control.

Control de canal entrada y salida de datos.

En el dispositivo de memoria se almacenan los datos del proceso a elaborar (o ya elaborados) así como las normas (programas) según las cuales deben ser elaborados los datos. A instancia del dispositivo de mando, son transmitidos al dispositivo de cálculo los datos a elaborar y una vez elaborados son puestos a disposición del canal de entrada y salida.

En el dispositivo de cálculo son efectuadas las operaciones básicas aritméticas y lógicas como, por ejemplo, sumar, restar y comparar

El dispositivo de control en las calculadoras automáticas tiene la misma función que el operador de una calculadora de pupitre. Se ocupa de que cada uno de los elementos principales de la calculadora trabajen conjuntamente de forma correcta. Se ocupa de que los valores introducidos sean almacenados correctamente; que sean ejecutadas, con los operadores correctos y en el tiempo correcto, las operaciones en el dispositivo de cálculo, y que sean dispuestos a tiempo los valores de salida.

El control del canal de entrada y salida tiene la misión de contribuir con los datos de entrada y salida y de llevar los datos de entrada y programación al acumulador de datos central, o bien conducir lor valores de salida desde el acumulador central a los dispositivos de salida de datos. Al control del canal de entrada y salida se conectan, por ejemplo, los siguientes aparatos: lector de tarjetas perforadas, perforadora de tarjetas, impresora, entrega y salida de procesos...

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc) http://materconstrucc.revistas.csic.es

La unidad central del ordenador dispone solamente de un número reducido de canales de entrada y salida, a través de los cuales debe tener lugar el tráfico con los numerosos aparatos de medida y elementos de regulación del proceso. Una unidad de control especial que se ocupa de la conexión a los aparatos de la periferia del proceso y de la preparación de señales (transformación A/D y D/A, respectivamente), es el distribuidor de circulación.

Los aparatos de medida como termoelementos, manómetros, etc., emiten señales eléctricas analógicas (intensidades o tensiones) que deben ser *digitalizadas* en la calculadora para su elaboración. Los aparatos utilizados para ello, transformadores analógico-digitales (transformadores A/D), no necesitan ser montados en cada canal de medida, como consecuencia de la elevada velocidad de conversión del transformador A/D y de la velocidad de transmisión de un canal de datos frente a la frecuencia de lectura necesaria de un aparato de medida. Entre el transformador A/D y el *captador* está conectado un dispositivo de pregunta (Multiplex) que lo mismo que un conmutador de puntos de medida, conecta uno tras otro al transformador, cada uno de los canales. En el caso de aparatos de medida e instalaciones de vigilancia, que emiten señales digitales (impulsos) (medidores de caudal, contadores eléctricos, etc.), puede hacerse directamente la lectura en la calculadora, sin transformación alguna.

Para vigilar los procesos son aplicados además aparatos, en los que las posiciones de contacto (o tensiones) representan condiciones del proceso. Dichas señales son asimismo leídas a través de la instalación de consulta de la memoria digital.

Semejantes instalaciones producen la entrega de señales al proceso. Los valores que se presentan al calculador en forma digital y que deben salir como valores analógicos se convierten en un transformador digital-analógico D/A.

La calculadora central de un ordenador de procesos debe disponer además de las siguientes instalaciones especiales:

- Sistema Interrupt con control de prioridad.
- Emisor interno de tiempo.
- Equipo de protección de memoria.

La instalación interna más importante para ordenador de procesos es la *interrupción escalonada de programa con control de prioridad.* Técnicamente esto se logra, mediante interruptores electrónicos, que se desconectan mediante sucesos de proceso externos o internos. Estos son consultados permanentemente por la calculadora, paralelamente al programa en marcha. Si un Interrupt está desconectado, se interrumpe el programa en marcha y se deriva en un Interrupt asociado. Tras la ejecución de la rutina Interrupt, se continúa el programa interrumpido. Mediante el control de prioridad, sólo se permite la interrupción de los programas de rango inferior, en el caso de varios niveles de Interrupt; si se presenta durante el Interrupt un programa de rango superior, se almacena hasta que dicho programa ha sido elaborado.

Para la vigilancia de procesos deben ser leídos en tiempos, o en intervalos de tiempo, determinados, valores de medida, posiciones de contactos, etc., y ser elaborados por

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://materconstrucc.revistas.csic.es

la calculadora. Para poder llevar a cabo el conocimiento de dichos datos en el momento adecuado para cada programa, el computador dispone de contadores y relojes internos, que producen interrupciones en cada programa a intervalos de tiempo prefijados.

Por motivos de seguridad, la unidad central de la calculadora de procesos, debe estar provista de un dispositivo de protección de memoria que impida el traslado de lugares o sectores de la memoria central y con ello la destrucción de programas como consecuencia de valores de entrada demasiado grandes o de errores de programación.

Seguidamente se exponen las tareas fundamentales del ordenador de procesos.

Una de las funciones más importantes del ordenador de procesos "on-line" es la *reunión de valores de medida.* Los valores de medida son consultados bien cíclicamente (en un orden fijo) como resultado de decisiones lógicas elegidas por la calculadora, o bien anunciados por el proceso mediante Interrupt.

El ciclo de consulta debe ser, por una parte, lo bastante rápido para que las modificaciones en el proceso sean registradas a tiempo y, por otra parte, lo bastante lento para que la calculadora no se sobrecargue innecesariamente.

Entre la magnitud de salida de un emisor y el correspondiente valor de la medida, existe a menudo una relación no lineal; un ejemplo lo constituye la curva característica de un termoelemento. En tales casos debe efectuarse una linealización de la curva característica. Ello puede estar ya cableado, pero, sin embargo, es ventajoso efectuarlo por programa en la calculadora de procesos.

La *correlación de valores de medida* con ayuda de otros valores o tablas de valores almacenados es posible efectuarla en la calculadora, fácil y rápidamente.

La acumulación de valores de medida que fueron tomados a través de intervalos de tiempo suficientemente pequeños, suministra *valores de integración* de magnitudes de medida lo suficientemente exactos. (p. ejemplo: medida de cantidades). El cociente del valor de la integral por el número de sumas parciales proporciona el *valor medio.*

Una tarea del ordenador denominada también "Reducción de datos" consiste en la combinación de varias magnitudes para dar otra "*magnitud característica*" con mayor poder de aseveración. Un ejemplo para un cálculo simple de magnitudes características, es el cálculo del flujo de un gas (seco) partiendo de la diferencia de presiones, presión y temperatura. Otros ejemplos son el cálculo del consumo específico de energía y el rendimiento de las instalaciones del proceso.

En el estado normal del proceso, se pueden determinar normalmente las magnitudes de medida, mediante los correspondientes valores límites superior e inferior de los sectores marcados, entre los cuales se deben mover los valores de medida. Cuando se sobrepasa uno de dichos límites, debe disparar un aviso (señal acústica u óptica, expresión protocolaria) o una intervención directa en el proceso. Si se hace necesaria una rápida reacción en el caso de sobrepasarse el valor límite (es decir elaboración en la calculadora), la determinación del cruce mediante consulta, no tiene lugar por programa, sino a través de Interrupt.

Para la *comprobación de valores límite* hay que calcular:

— Control de magnitudes de todo tipo o de sus derivaciones temporales.

— Control de valores medios y magnitudes características.

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc) http://materconstrucc.revistas.csic.es

— Control de los tiempos de servicio de las instalaciones de los procesos (para la entrega de instrucciones de entretenimiento).

Los valores de medida son solicitados por la calculadora de procesos y pueden también programarse como los valores variables del estado del proceso.

La calculadora vigila en el *control del desarrollo del proceso,* el transcurso ordenado y a tiempo de, por ejemplo, las condiciones de avance para los controles del transcurso; avisa estados de servicio no permitidos, pero no actúa directamente.

Las informaciones esenciales sobre un proceso pueden ser entregadas por la calculadora, ordenadas en el tiempo y expresadas técnicamente. La entrega de valores puede tener lugar por consulta o en intervalos fijos de tiempo. (Protocolos horarios, diarios o de turnos). *La protocolación* ofrece las siguientes ventajas esenciales frente a los métodos normales:

— Un protocolo objetivo que se obtiene sin la intervención humana.
— Un protocolo concentrado que resume todas las características principales del desarrollo del proceso, haciendo posible una clara visión y una fácil evaluación.
— Un protocolo sólido que contiene ya magnitudes elaboradas (reducidas).
— Un protocolo legible por las máquinas que se presenta en portadoras de datos (tarjetas y cintas perforadas) y que pueden ser leídos directamente en una calculadora off-line, en el caso de trabajos de evaluación para estudio de procesos.

En relación con esto aún no se ha de mencionar, que aplicando la calculadora de procesos para la comprensión de valores de medida, vigilancia de valores extremos, cálculo de magnitudes características y de protocolo, puede eliminarse la mayor parte de la instrumentación para la vigilancia de valores (indicador, registrador, tablero de avisos).

El sistema de cálculo de procesos está en situación de aceptar la función de instalaciones convencionales de control y regulación.

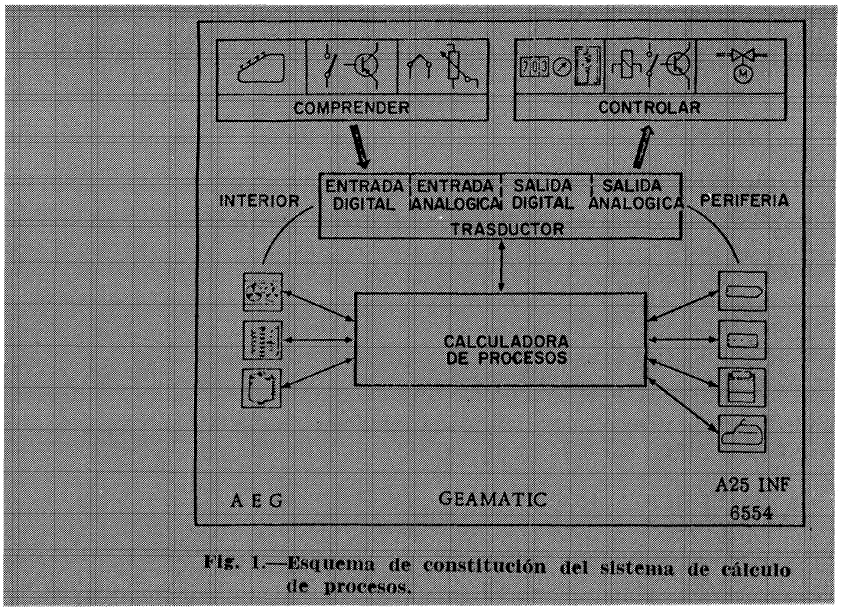

Fig. 1.—Esquema de constitución del sistema de cálculo de procesos.

En la "regulación digital directa" (en forma abreviada DDC), los reguladores convencionales en los bucles de regulación individuales de una instalación se sustituyen por la unidad central del sistema de cálculo de procesos trabajando como regulador.

Los valores de medida de las magnitudes a regular, se consultan cíclicamente presentándolos al sistema de distribución transformados, generalmente, de la forma analógica a la digital y seguidamente almacenados. Para cada circuito de regulación la calculadora conoce el valor nominal y las funciones de regulación. De acuerdo con esta información, son determinadas en un programa de cálculo, las órdenes de regulación para los elementos de ajuste de los tramos de regulación individuales, saliendo estas órdenes a través del trasductor.

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://materconstrucc.revistas.csic.es

La aplicación del DDC puede conducir a una reducción de los costos de toda la instalación, pero sobre todo posibilita la realización de tareas de regulación hasta ahora difíciles de llevar a cabo.

La aplicación de un sistema de cálculo de proceso encuentra su fundamento económico en:

— la mejora de la conducción automática del proceso;

— la conducción óptima del proceso.

La primera razón se consigue mediante la conversión del modo de conducción seguido hasta la fecha en la calculadora de procesos.

La *conducción óptima del proceso* a través del sistema de cálculo de procesos es posible sobre:

— un modelo de procesos físico-químico o bien matemático;

— el procedimiento de exploración.

El procedimiento de modelo es costoso y la dificultad reside en la disposición del modelo, para lo cual hacen falta generalmente varios hombres más.

El procedimiento de exploración en su forma pura, en la que la calculadora de procesos, sin conocimiento de las relaciones del proceso, sólo debe buscar el óptimo a base de una estrategia de exploración, no trae generalmente ningún éxito.

Tiene pleno sentido y está próximo a la realidad, cuando se aceptan conceptos de regulación ya realizados, regulaciones adicionales y nuevos métodos de regulación previstos dados por la calculadora de procesos, y conocimientos de procesos derivados, de las medidas necesarias para la optimación de un procedimiento de exploración de campo más reducido.

Uno de los supuestos esenciales para la marcha uniforme del proceso de combustión en el horno rotatorio, es la composición constante del crudo introducido en él, ya que mediante dicho crudo se determinan las necesidades en calor y las temperaturas necesarias en el horno. Este supuesto debe satisfacerse con gran exactitud si no es posible compensar las influencias de una composición variable, con un control del horno en correspondencia muy complicado.

La comparación previa de la composición del crudo permite una regulación más simple del horno al realizar su automación. En casos particulares puede incluso evitarse un grado de automación más elevado. Además pueden mantenerse más bajos los costos iniciales de inversión para este concepto.

Las medidas para el contraste de la composición del crudo o bien para el estrechamiento de la zona de oscilación, debieran comenzar ya en la trituración de piedra y continuarse a lo largo de todo el proceso de preparación.

Para unas materias primas de composición muy poco uniforme, que además oscila muy irregularmente, encuentra una aplicación ventajosa el procedimiento del lecho de

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc) http://materconstrucc.revistas.csic.es

mezcla (prehomogeneización), mediante el cual puede producirse una mezcla correcta y lista para el horno.

Este procedimiento no va a tratarse aquí con más detalle; sin embargo, debemos resaltar que el control necesario para este procedimiento, es semejante al que se describe seguidamente y para el que se recomienda también la aplicación de un sistema de cálculo de procesos. La regulación considerada se basa en que los componentes de la materia prima, de composición claramente diferenciable, están dispuestos a la entrada del molino.

Esto puede conseguirse mediante una explotación selectiva en la trituración y con otras medidas adecuadas a las instalaciones disponibles o en proyecto, que se refieren a toma de muestras y sistema de análisis.

Como depósito de material entre los molinos que trabajan en servicio continuo y la trituración que trabaja periódicamente son necesarios, en general, grandes depósitos de piedra que pueden ser utilizados para mejorar la uniformidad de los componentes y para estrechar el campo de oscilación.

Se presenta la tarea de conseguir un sistema de regulación con el que puedan ser mantenidos, entre límites de tolerancia estrechos, los valores nominales para la composición química de la materia prima.

Además se debe poder calcular rápida y exactamente, el valor real de la composición química del crudo, es decir, se deben determinar los valores analíticos para CO_3Ca, Al_2O_3, Fe_2O_3 y SiO_2. De estos valores se debe calcular el valor real de las magnitudes características del crudo y compararlo con los valores nominales. De las divergencias entre el valor real y nominal resultan las medidas de regulación a tomar inmediatamente mediante las cuales se modifica de tal forma la carga a dosificar, que esa desviación es mínima.

Para la aplicación de un sistema de regulación se deben considerar los siguientes sectores importantes:

— Estructuración técnica del procedimiento y condiciones para la instalación de crudo en polvo y de los sistemas de mezcla.

— Equipo de aparatos para medir y regular.

— Cálculo de mezcla y táctica de mando.

El tipo de molino más extendido es el tubular; a veces, sin embargo, se aplican los molinos de rodillos elásticos para la preparación de crudo. El tiempo de permanencia del material en el molino es de unos 30 minutos; el tiempo medio de circulación del material en los molinos de rodillos elásticos es de unos 5 minutos.

Para los componentes de la piedra caliza se debe exigir un campo de oscilación lo más reducido posible y un ritmo de oscilación en su composición química lo más lento posible; también debiera existir una diferencia mínima de la mayor constancia tolerable, en la composición química del resto de los componentes y que se mantuviera continuamente.

Mediante el equipo técnico o bien a través de la estructura de la organización del sistema de mezcla, se determina un tiempo muerto de la instalación.

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://materconstrucc.revistas.csic.es

Dicho tiempo es suma de los siguientes tiempos parciales:

Tiempo de ajuste del dosificador.

Tiempo de transporte hasta el molino.

Tiempo de permanencia en el molino (tiempo muerto de molino).

Tiempo para toma de muestras o para el transporte de las mismas.

Tiempo para la preparación de muestras.

Tiempo para la realización del análisis.

Tiempo para el cálculo del ajuste del dosificador como consecuencia del análisis.

Mediante el tiempo muerto de la instalación, se determina el intervalo adecuado entre dos tomas de muestra; con él queda establecida la cantidad mal dosificada entre dos intervenciones de control y, en consecuencia, el resultado que puede lograrse con el control (desviación de los valores nominales).

En general, después de la instalación de molienda existen instalaciones homogeneizadoras (sistemas de circulación neumáticos o mecánicos); se trata de una parte de la instalación de ensilado, necesaria, de todos modos, para el almacenamiento del horno, o de silos levantados para este fin. La capacidad de almacenamiento y de mezcla forma parte de la exactitud de ajuste del crudo en polvo. La homogeneización por carga y por circulación tiene distinto significado en el sentido de un "retorno" para el control de dosificación.

El análisis químico de muestras de crudo, en cuanto a las cuatro combinaciones contenidas en las magnitudes características, no se puede realizar en el corto plazo de tiempo necesario con los aparatos y métodos de análisis convencionales.

El método del análisis por fluorescencia de rayos X, que necesita un tiempo del orden de 4 minutos, ha progresado de tal forma, que existen en el mercado aparatos automáticos para su aplicación en el proceso.

Para estos aparatos hay que preparar las muestras en forma de polvo.

En el mercado se encuentran aparatos que trabajan de forma continua o discontinua.

Los aparatos que trabajan discontinuamente se construyen como aparatos secuenciales de varios canales, trabajando de forma continua como aparato multicanal.

En los aparatos con varios canales, a cada elemento a analizar le corresponde, un canal de medida, ajustado al correspondiente ángulo del elemento.

Los aparatos secuenciales contienen solamente un canal de medida. El espectrómetro móvil se conduce al ángulo que corresponde al elemento a analizar.

Los aparatos que trabajan de forma continua pueden conectarse directamente a la corriente de material, junto con sus dispositivos automáticos para la toma y conducción de muestras. En el caso de aparatos que trabajan discontinuamente la toma de muestras tiene lugar por separado. La muestra preparada se introduce generalmente a mano.

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc) http://materconstrucc.revistas.csic.es

Como alimentador bajo los depósitos de componentes se emplean las bandas de dosificación, en las que un bucle interno de regulación se ocupa de mantener el valor nominal de la carga.

En instalaciones para la toma de muestras, transporte y preparación pueden utilizarse:

— tomamuestras en cantidades proporcionales;

— fraccionador de muestras;

— instalación de correo por tubos.

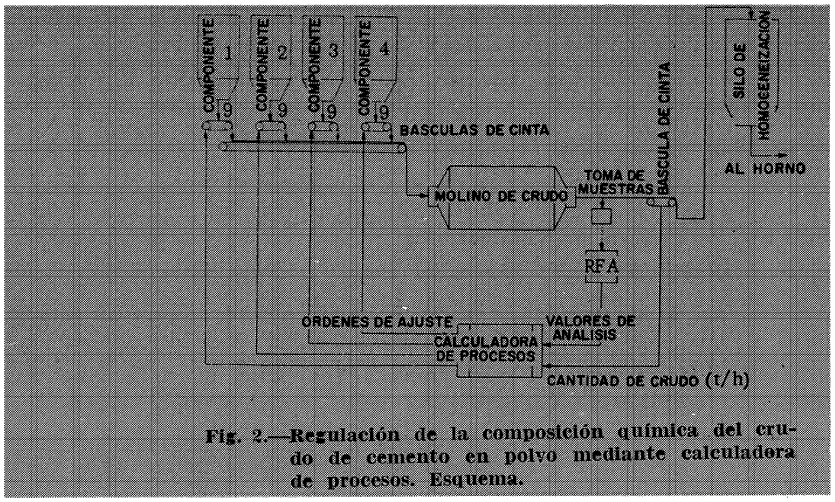

Fig. 2.—Regulación de la composición química del crudo de cemento en polvo mediante calculadora de procesos. Esquema.

La figura 2 muestra la constitución principal del sistema de regulación en un molino tubular con cuatro componentes en la materia prima, toma de muestras, aparato RFA discontinuo y un sistema de cálculo de proceso como instalación de regulación.

Debido a que la finura del molido de un molino de crudo, corresponde generalmente a la exigida para el aparato RFA, la toma de la muestra tiene lugar detrás del molino. El tiempo muerto del molino, que determina prácticamente el de toda la instalación, tiene aquí plena efectividad. La toma de muestras se hace proporcional a las cantidades alimentadas a lo largo de un período de unos 40 minutos. Las muestras así obtenidas, facilitan el valor medio de la composición química de la cantidad introducida bien en el depósito de crudo, o bien en los silos de homogeneización.

La calculadora de procesos, toma directamente del aparato RFA los datos de análisis de las muestras recogidas. Con esos datos, calcula las magnitudes características del crudo en el período anterior, para una mezcla de cuatro componentes, por ejemplo, cal standard (KST), C_3S y C_2A, y los compara con los valores consigna acumulados. De las diferencias ΔKST, ΔC_3S y ΔC_2A el aparato debe calcular la regulación de los alimentadores de componentes, reduciendo al mínimo en el próximo período, dichas desviaciones de las magnitudes características.

Puesto que cada componente de la materia prima tiene una cierta proporción de cada uno de los cuatro óxidos necesarios para la determinación de las magnitudes características, dichas magnitudes características se influencian por la modificación en cada dosificador. Esta relación reproduce la ecuación matricial correspondiente al balance de materiales.

$$\begin{pmatrix} \Delta KST \\ \Delta C_3S \\ \Delta C_2A \\ \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & \cdots\cdots & & a_{24} \\ & \cdots\cdots & & \\ a_{41} & \cdots\cdots & & a_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta q_1 \\ \Delta q_2 \\ \Delta q_3 \\ \Delta q_4 \end{pmatrix}$$

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://materconstrucc.revistas.csic.es

En el caso de carga constante del molino, la suma de las modificaciones de los ajustes de alimentadores, debe ser cero. Para el programa de control de los dosificadores, deben calcularse las modificaciones necesarias de sus ajustes en función de las desviaciones de regulación (ΔKST; ΔC_3S; ΔC_2A). Esto tiene lugar con la ayuda de los métodos de cálculo de compensación (método de error de los mínimos cuadrados).

Con ayuda de una báscula de cinta, puede determinarse la cantidad de crudo que entra en el silo de homogeneización, en un período de tiempo.

De esta cantidad se conoce también el análisis químico medio. Si se trata de un silo para la homogeneización de distintas cargas, puede determinarse de forma continua, mediante la calculadora, el análisis químico medio del contenido del depósito, y tener en cuenta, posteriormente, en el programa de control para que el depósito lleno corresponda a los valores nominales o consigna de la composición química deseada. La consideración de la composición química en el depósito, tiene lugar con diversas pesadas según esté casi vacío o casi lleno.

Se está muy cerca de conseguir una reducción en el tiempo muerto de la instalación, para conseguir con períodos de tanteo más cortos y cantidades dosificadas erróneamente más reducidas una tendencia más estrecha en la regulación de las magnitudes características.

Desde el punto de vista de la realización técnica de procedimiento de la instalación de molienda de crudo, se ofrece la posibilidad de aplicar un molino de rodillos flexibles en lugar de tubular, cuyo tiempo medio de circulación del material es de 5 minutos.

En instalaciones con molinos tubulares, puede conseguirse un acortamiento del tiempo muerto, haciendo que la toma de muestra tenga lugar en la mezcla de piedra triturada en lugar de en el crudo en polvo; con esto se elimina la influencia del tiempo muerto de los molinos. Sin embargo, hay que tener aquí en cuenta, que como consecuencia de la dependencia exponencial de la cantidad de muestra de las magnitudes características, deben prepararse cantidades correspondientemente grandes en una instalación de preparación previa, que tiene por lo menos dos escalones de trituración y dosificación y debe estar preparada además para un secado del material. El tiempo total para la preparación de muestras y análisis, se sitúa entonces en unos 15 minutos.

Si se utiliza un aparato RFA continuo, no se gasta prácticamente tiempo en la preparación de muestras.

En la tabla 1 se indican los tiempos muertos de instalación y las desviaciones standard previsibles, para 5 variantes. Desde el punto de vista del enjuiciamiento del costo, hay que tener en cuenta, que el precio del aparato continuo de varios canales es más caro.

Se comprueba que las circunstancias más favorables para una instalación con molino de rodillos flexibles, sitúan delante la toma de muestras de crudo y el aparato RFA discontinuo.

El comportamiento de un silo de homogeneización con circulación, puede simularse mediante un simple elemento de retardo, que calcula la salida como función de la entrada y se toma en consideración en las ecuaciones del programa de control.

En la utilización del sistema de regulación de la instalación antes descrita, se puede prever una variación standard del ± 1 en el crudo acabado.

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc) http://materconstrucc.revistas.csic.es

La regulación antes descrita de la composición química, se lleva a cabo con un sistema de cálculo de proceso reducido.

Para ello son necesarias las siguientes funciones:

— Comprensión directa de los datos de análisis del aparato RFA, de los cuatro elementos característicos, y vigilancia de sus límites.

— Determinación de las concentraciones para CaO, Al_2O_3, Fe_2O_3 y SiO_2, de las curvas patrón almacenadas en la calculadora.

— Comprensión y almacenaje de las cantidades de crudo transportadas en cada período a los silos de homogeneización y el correspondiente análisis.

— Determinación de la corrección necesaria para las instalaciones de dosificación en el siguiente período a través del sistema de ecuaciones del modelo matemático y del programa de control, misión de las variaciones de ajuste y comprensión de la ejecución.

— Vigilancia de las funciones del aparato RFA y de las funciones esenciales de la instalación para el control químico con inscripción de los avisos de perturbación.

— Inscripción de un informe de producción de turno o bien por día.

El sistema de cálculo de proceso necesario para esta regulación debiera aprovecharse óptimamente y ocuparse además de otras tareas.

Caso de hacer una utilización total de las funciones básicas del sistema de cálculo de proceso, enunciadas al principio:

Comprensión de valores de medida.

Vigilancia de valores límite.

Control del desarrollo del servicio.

Se consigue un funcionamiento completamente automático y casi libre de perturbaciones, en la instalación de molienda.

Además, toma importancia el cálculo de magnitudes características para el servicio de molinos. Como ejemplo se indica el balance térmico de una instalación de secado y molienda que se determina en intervalos de 15 minutos por la calculadora de procesos. De los datos de medida se puede calcular la cantidad de calor transmitida desde el gas al material y mediante el balance térmico se puede determinar el rendimiento del secado.

Al contrario que en la regulación analógica, en la regulación programada digitalmente se calculan las magnitudes de ajuste en secciones finitas de tiempo.

Para el regulador continuo PID vale por ejemplo:

$$Y_{(t)} = V\left[\bar{e}_{(t)} + \frac{1}{T_N}\int_0^t \bar{e}(\tau)d\tau + T_v\frac{de(t)}{dt}\right],$$

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://materconstrucc.revistas.csic.es

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)

TABLA 1

Tipo de molino	Toma de muestra de	Tiempo muerto de transporte y de molinos	Toma de muestra	Preparación de muestras	Preparación de muestras	Análisis RF		Tiempo muerto de las instalaciones	Variación del standard de cal	Costo
						Discontinuo	Continuo			
Molino tubular	Polvo crudo	Aprox. 35 min	Aprox. 2-10 min.	No hay	Aprox. 3 min.	Aprox. 4 min.	—	Aprox. 45-50 min.	± 1	Calculadora de proceso RFA (discontinuo)
			No hay	No hay	No hay	—	Ningún consumo de tiempo	Aprox. 35 min.	± 1	Calculadora de proceso RFA (continuo)
Molino tubular	Mezcla de piedra cruda	No hay	Aprox. 2-10 min.	Aprox. 10 min.	Aprox. 3 min.	Aprox. 4 min.	—	Aprox. 20-25 min.	± 0,5	Calculadora de proceso RFA (discontinuo). Instalación de preparación
Molino de rodillos flexibles	Polvo crudo	Aprox. 8 min.	Aprox. 2-10 min.	No hay	Aprox. 3 min.	Aprox. 4 min.	—	Aprox. 20-25 min.	± 0,5	Calculadora de proceso RFA (discontinuo)
			No hay	No hay	No hay	—	Ningún consumo de tiempo	Aprox. 10 min.	± 0,3	Calculadora de proceso RFA (continuo)

http://materconstrucc.revistas.csic.es

donde $e(t) = w(t) - x(t)$,

siendo:

$y(t)$ = magnitud de ajuste

$e(t)$ = desviación de la regulación

$w(t)$ = magnitud de mando

$x(t)$ = magnitud de regulación

V = Amplificación del regulador

T_N = Tiempo de reajuste del regulador

T_V = Tiempo de corrección del regulador.

Durante el paso a la función de regulación digital, la integral es aproximada mediante una suma y en lugar de un cociente diferencial se presenta un cociente de diferencias:

$$Y_N = V\left[\bar{e}_n + \frac{T}{T_N}\sum_{\delta=0}^{n} e_v + \frac{T_V}{T}(e_n - e_{n-1})\right],$$

en donde T es la duración del período de exploración.

El índice "n" indica, que se trata del valor correspondiente al punto del tiempo $t = nT$.

No se calcula para cada intervalo de exploración el valor absoluto y_n de la magnitud de ajuste, sino solamente el incremento Δy, resultando entonces:

$$\Delta Y = Y_n - Y_{n-1} = V\left[e_n - e_{n-1} + \frac{T}{T_N}e_n + \frac{T_V}{T}(e_n - 2e_{n-1} + e_{n-2})\right].$$

Para la regulación del grado de llenado o del tiempo de paso en molinos tubulares que están sujetos a grandes tiempos muertos (por ejemplo, en el caso de molinos de circulación con elevador de cangilones, ajustan la cantidad alimentada en función de la potencia del elevador de cangilones), el DDC ofrece la posibilidad de una mejora mediante el cálculo de la magnitud de ajuste en períodos de tiempo que pueden adaptarse a los tiempos del espacio de regulación.

Asimismo, con motivo de los tiempos muertos y de arranque existentes se dispone de los circuitos de regulación de temperatura de las instalaciones de secado y molienda para la aplicación del DDC.

Un sistema de cálculo de proceso reducido, utilizado para las tareas antes mencionadas, puede considerarse como escalón básico de la automatización de las fábricas de cemento; es posible y adecuada su ampliación para ocuparse de otras tareas teniendo en cuenta las correspondientes circunstancias del servicio.

Así pues, se debe tener en cuenta una ampliación, en la que el sistema de cálculo

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://materconstrucc.revistas.csic.es

de procesos se ocupe también de la regulación del sistema de hornos sobre la base DDC; con esto pueden esperarse mejoras en la regulación de:

- la temperatura de la zona de sinterización;
- la temperatura del aire secundario;
- la temperatura de los gases de escape;
- la temperatura del material en la zona de calcinación;
- la profundidad del lecho de material.

Un estado de funciones semejante a la de la instalación de molienda de crudo sirve para la instalación de molienda de cemento. La vigilancia y control del proceso de molienda en el caso de molinos con circulación con elevador de cangilones, puede conseguirse mediante un aparato automático de ensayo de finura, que, a través de la calculadora de procesos, actúa sobre el ajuste del separador.

Si después de aplicar un sistema de cálculo de proceso reducido, es necesario un grado de automatización mayor, por ejemplo, optimación del proceso del horno rotatorio a través de un modelo de proceso u optimación del proceso total, hay que anteponer una calculadora principal que realice estas funciones en el caso de fallar los sistemas satélites; estas tareas (bucles de regulación DDC) las efectúa en parte, así como también las misiones off-line mediante un sistema de tiempo libre, que permite el servicio del centro de cálculo.

La clase de misiones off-line son, por ejemplo:

— planificación de producción y estructura.

Para tal fin la trituración de piedras se distribuye en unidades de espacio, cuyo volumen, análisis químico y estado de trituración, pueden ser almacenados en tarjetas perforadas. Estos datos son elaborados en una calculadora mediante un programa que tiene en cuenta todas las magnitudes que pueden afectar, para obtener una planificación de la producción y de la composición determinada óptimamente:

— cálculo técnico-científico de todo tipo, como por ejemplo, cálculo del llenado de molinos tubulares;

— planificación y vigilancia del entretenimiento y ejecución de reparaciones;

— determinación de la distribución de cemento más adecuada en cuanto a costos (problema de transportes).

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc) http://materconstrucc.revistas.csic.es