УДК 681.518.52:544.023.523.002.56

Тигарев А.М.
Tigarev A.M.

ВЫБОР ЦЕЛЕВОЙ ФУНКЦИИ И РЕГУЛИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ПОРОШКОВЫХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

CHOICE OF CRITERION FUNCTION AND ADJUSTABLE PARAMETERS AT RECEPTION OF POWDER RADIO ENGINEERING MATERIALS

Аннотация. В статье предложена методика выбора целевой функции и регулируемых параметров при разработке системы автоматизации регулирования дисперсного состава ферритовых порошков, получаемых распылением суспензий пневматической форсункой.

Summary. In article the technique of a choice of criterion function and adjustable parameters is offered at system engineering automation of regulation of disperse structure of the ferrite powders received by dispersion of suspensions by a pneumatic atomizer.

Значительное количество изделий электронной техники, таких как ферриты, радиокерамика (пьезоизлучатели), люминофоры (для кинескопов), оптоволоконные кабели (на основе световодов из стекла) и т. п., получают на основе порошковых технологий [1-4]. При производстве изделий электронной техники с заданными параметрами основной задачей является производство электрорадиоматериалов с заданными свойствами. В свою очередь, эти свойства определяются в основном дисперсным составом исходных порошковых материалов, или, точнее дисперсных систем (ДС), а наиболее информативной характеристикой дисперсного состава является функция распределения частиц по размерным параметрам, например эквивалентным диаметрам, позволяющая определять содержание любой фракции дисперсной фазы в порошке [5]. Таким образом, одной из основных проблем является получение ДС с требуемой функцией распределения частиц по размерам.

В большинстве случаев существующие способы управления дисперсным составом ДС в технологических процессах их производства (ТП) основаны на результатах ситового, микроскопического, седиментационного и др. методов и управление обычно выполняют по усреднённым показателям (средний арифметический, медианный диаметры частиц, полная, удельная поверхность дисперсной фазы), которые обычно выбирают в качестве целевой функции управления [6, 7].

Однако столь упрощённый выбор целевой функции является в настоящее время недостаточно обоснованным, так как был вызван отсутствием необходимой номенклатуры устройств для экспресс-ного контроля параметров ДС, способных работать непосредственно в ходе ТП. Разработка современной аппаратуры [8], позволяющей выполнять экспрессно определение функции распределения ДС непосредственно в ходе ТП, кардинально меняет существующие подходы к управлению дисперсным составом ДС.

Поэтому целью данной работы является обоснование выбора целевой функции для систем оперативного управления дисперсным составом порошков и, как следствие, определение управляющих воздействий при производстве порошковых материалов для электронной техники.

Решение этой проблемы рассмотрено применительно к ТП производства ферритовых порошков на этапе распылительной сушки. Распылительная сушка при производстве ферритов уже длительное время применяется в радиоэлектронном производстве, как в странах СНГ, так и за рубежом, но, несмотря на это в литературе и других доступных источниках информации мало сообщений о технологических параметрах и режимах изготовления таких материалов. В ряде источников прямо указывается, что эти сведения являются строгим секретом конкурирующих зарубежных фирм. Известные же сведения показывают, что функция распределения распыленных ферритовых порошков подчиняется логнормальному закону либо закону распределения Вейбулла [4].

Для формулирования критериев оптимизации системы управления и выбора регулируемых переменных при разработке системы управления дисперсным составом ДС необходимо обосновать её целевую функцию. В самом общем случае, такой целевой функцией для системы регулирования дисперсного состава ДС в процессе производства предлагается получение ДС с требуемой функцией распределения, т.е.

$$\Phi = f\left(F_з\left(x\right)\right),$$

где $F_З(x)$ – задаваемая функция распределения, определяемая целевым назначением ДС.

Для большинства технологических процессов производства ДС [1 … 4, 6 … 8], основным требованием, а, следовательно, целевой функцией управления, является условие максимального выхода заданного диапазона размеров частиц порошка или требуемой фракции.

При выполнении этого условия снижается расход исходного материала, дополнительные потери энергоресурсов на извлечение аналогичной массы ДС вследствие несоответствия функции распределения заданной, потери на дополнительную переработку неиспользуемых фракций и т. д. Поэтому, это условие предлагается в качестве интегрального критерия по дисперсному составу, характеризующего требуемую фракцию размеров частиц (рис. 1) в следующем виде

$$K_д = F(\delta_2) - F(\delta_1) \quad \text{или} \quad K_д = \int_{\delta_1}^{\delta_2} f(\delta) d\delta, \; 0 < K_д < 1,$$

где δ_1, δ_2 – минимальный и максимальный диаметр частиц фракции, мкм; $F(\delta)$ – функция распределения частиц ДС по размерным параметрам; $f(\delta) = \dfrac{dF}{d\delta}$ – плотность вероятности.

Иллюстрация возможных вариантов плотности вероятности распределения размеров частиц порошка и требуемого диапазона размеров частиц (фракции) приведена на рис. 1.

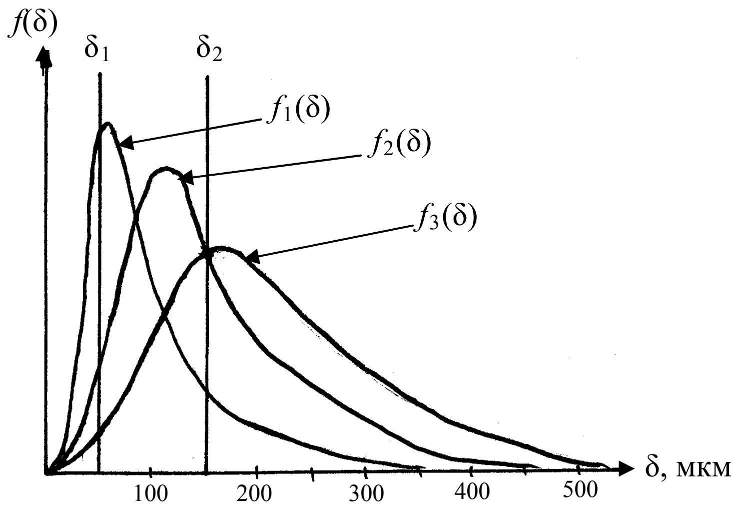

Рисунок 1 – Плотности вероятности распределения размеров частиц порошка и требуемой фракции

Задачу обеспечения максимального выхода требуемой фракции решает процедура максимизации критерия по дисперсному составу ДС, предусматривающая получение такой функции распределения частиц ДС, параметры которой отвечают требованию критерия $K_д$. В общем случае, число независимых параметров функции распределения частиц ДС по размерам обычно не превышает трёх [5], а наиболее типичным случаем является зависимость функции распределения от двух параметров. Процедура определения критерия $K_д$, сводится к нахождению наибольшей интервальной вероятности известного распределения, по значениям которой определяют соответствующие параметры функции распределения $F(\delta)$. Таким образом, ставится задача получить наибольшее значение вероятности

$$P(\delta_1 < \delta < \delta_2) = \int_{\delta_1}^{\delta_2} f(\delta) d\delta = F_2 - F_1 ,$$

где $f(\delta)$ – известная плотность вероятности случайного признака δ.

Из рис. 2,а следует, что заштрихованная площадь S под плотностью вероятности $f(\delta)$ и отрезок $(F_2 – F_1)$ на оси ординат (рис. 2,б) принимает одинаковые значения для фиксированного интервала δ_1, δ_2. При $\delta_2 - \delta_1$=const большему значению разности $F_2 - F_1$ соответствует больший угол φ наклона хорды, стягивающей точки A и B кривой функции распределения.

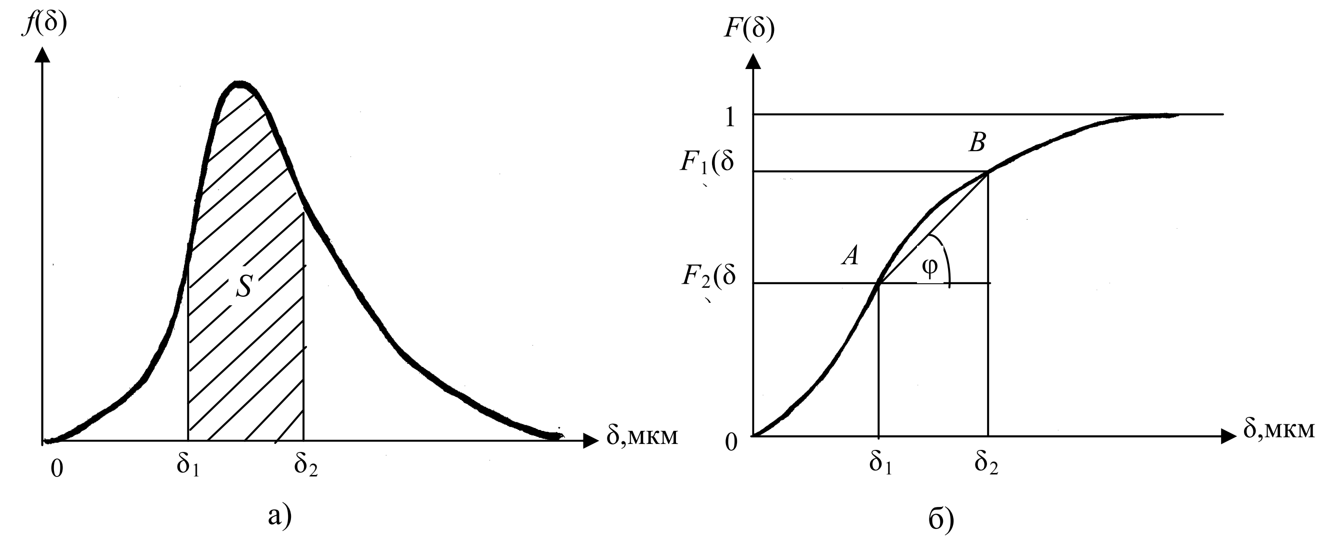

Рисунок 2 – Пример определения значения интервальной вероятности известной функции распределения: а – плотность вероятности; б – функция распределения

Поэтому

$$\max P(\delta_1 < \delta < \delta_2) = \max[F(\delta_2) - F(\delta_1)] = (\delta_2 - \delta_1)\max \mathrm{tg}\varphi.$$

Зависимость между $F(\delta_2)$ и $F(\delta_1)$ запишем с помощью ряда Тейлора

$$F(\delta_2) = F(\delta_1) + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{F^{(k)}(\delta_1)}{k!}(\delta_2 - \delta_1)^k .$$

Откуда следует

$$F(\delta_2) - F(\delta_1) = f(\delta_1)(\delta_2 - \delta_1) + \frac{f'(\delta_1)}{2}(\delta_2 - \delta_1)^2 + \ldots$$

Тогда

$$\max tg\varphi = \max \frac{F(\delta_2) - F(\delta_1)}{\delta_2 - \delta_1} = \max\left[f(\delta_1) + \frac{f'(\delta_1)}{2}(\delta_2 - \delta_1) + \ldots \right].$$

Точность последнего равенства зависит от числа слагаемых в разложении Тейлора. При квадратичной аппроксимации дуги AB достаточно ограничиться двумя слагаемыми, что сводит поставленную задачу к вычислению максимума суммы

$$S = f(\delta_1) + 0{,}5 f(\delta_2 - \delta_1) f'(\delta_1).$$

Учитывая, что порошковые материалы, применяемые при производстве ферритов, как правило, подчиняются логнормальному или закону распределения Вейбулла, покажем методику вычисления $max\, S$ на примере этих двухпараметрических распределений.

а) При логнормальном законе имеем

$$f(\delta) = \frac{1}{\delta\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln\delta - m)^2}{2\sigma^2} \right];$$

$$S(m, \sigma, \delta_1, \delta_2) = f(\delta_1) + \frac{f'(\delta_1)}{2}(\delta_2 - \delta_1) =$$

$$= \frac{1}{\sigma\delta_1\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln\delta_1 - m)^2}{2\sigma^2} \right]\left[1 - \frac{\Delta\delta}{2\delta_1}\left(1 + \frac{\ln\delta_1 - m}{\sigma^2} \right) \right]$$

где $\Delta\delta = \delta_2 - \delta_1$; m – медиана (мкм); σ – среднеквадратичное отклонение (мкм).

После дифференцирования получим

$$\frac{\partial S}{\partial m} = \frac{1}{\sigma\delta_1\sqrt{2\pi}} \left\{ \frac{\ln\delta_1 - m}{\sigma^2}\left[1 - \frac{\Delta\delta}{2\delta_1}\left(1 + \frac{\ln\delta_1 - m}{\sigma^2} \right) \right] + \frac{\Delta\delta}{2\sigma^2\delta_1} \right\} \exp\left[-\frac{(\ln\delta - m)^2}{2\sigma^2} \right]$$

$$\frac{\partial s}{\partial \sigma}=\frac{1}{\sigma\delta_1\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{(\ln\delta_1-m)^2}{2\sigma^2}\right]\times$$
$$\times\left\{-\frac{1}{\sigma}\left[1-\frac{\Delta\delta}{2\delta_1}\left(1+\frac{\ln\delta_1-m}{\sigma^2}\right)\right]+\frac{(\ln\delta_1-m)^2}{\sigma^2}\left[1-\frac{\Delta\delta}{2\delta_1}\left(1+\frac{\ln\delta_1-m}{\sigma^2}\right)\right]+\frac{\Delta\delta(\ln\delta_1-m)}{\sigma^3}\right\}.$$

Приравнивая нулю обе частные производные, получим систему уравнений относительно неизвестных параметров распределения m и σ.

$$\begin{cases}(\ln\delta_1-m)^2-\left(\dfrac{2\delta_1}{\Delta\sigma}-1\right)(\ln\delta_1-m)+1=0\\ \sigma^4-n\left[n+\dfrac{2(1+\delta_1)\Delta\delta}{2\delta_1-\Delta\delta}\right]\delta^2-n^3\,\dfrac{2\delta_1\Delta\delta}{2\delta_1-\Delta\delta}=0,\end{cases}\qquad(1)$$

где $n=\ln\delta_1-m$.

Порядок вычисления дисперсии логнормального закона из системы (1), выполняется в следующей последовательности:

1. Решение первого уравнения относительно параметра n и вычисление параметра $m=\ln\delta_1-n$.

2. Решение второго уравнения относительно параметра σ при известном n.

3. Вычисление дисперсии по известным значениям m и σ, т.е.

$$D=e^{\delta^2+2m}\left(e^{\sigma^2}-1\right).$$

б) Для распределения Вейбулла

$$f(\delta_1)=\alpha\lambda\delta_1^{\alpha-1}e^{-\lambda\delta_1^{\lambda}};$$
$$f'(\delta_1)=\lambda\alpha\delta_1^{\alpha-2}\left(\alpha-1-\lambda\alpha\delta_1^{\alpha}\right)e^{-\lambda\delta_1^{\alpha}};$$
$$S(\alpha,\lambda)=\alpha\lambda\delta_1^{\alpha-2}e^{-\lambda\delta_1^{\alpha}}\left[\delta_1+0{,}5(\delta_2-\delta_1)(\alpha-1-\alpha\lambda)\right];$$
$$\frac{\partial S}{\partial\alpha}=\lambda\delta_1^{\alpha-3}e^{-\lambda\delta_1^{\alpha}}\{\delta_1^2+0{,}5(\delta_2-\delta_1)[\alpha(1-\lambda)-1]\delta_1+\alpha(\alpha-2)[\delta_1+0{,}5(\delta_2-\delta_1)]\times$$
$$[\alpha(1-\lambda)-1]-0{,}5\alpha\lambda\delta_1(\delta_2-\delta_1)+\lambda^2\alpha\delta_1^{\alpha}[\delta_1+0{,}5(\delta_2-\delta_1)[\alpha(1-\lambda)-1]]\};$$
$$\frac{\partial S}{\partial\lambda}=\alpha\delta_1^{\alpha-2}e^{-\lambda\delta_1^{\alpha}}\{\delta_1+0{,}5(\delta_2-\delta_1)[(\alpha-1)-\alpha\lambda]-0{,}5\alpha\lambda(\delta_2-\delta_1)-$$
$$-\lambda\delta_1^{\alpha}[\delta_1+0{,}5(\alpha-1)(\delta_2-\delta_1)-0{,}5\alpha(\delta_2-\delta_1)\lambda]\}.$$

Приравнивая обе производные нулю, получим систему двух уравнений относительно параметров распределения α и λ.

$$\begin{cases}0{,}5\alpha^3\delta_1^{\alpha}(\delta_1+\delta_2)\lambda^2+0{,}5\alpha\left[2\delta_1(\delta_2-\delta_1)+\alpha(\alpha-2)(\delta_1+\delta_2)\lambda-\delta_1^2\right]=0,\\ 0{,}5\alpha\delta_1^{\alpha}(\delta_2-\delta_1)\lambda^2-\lambda(\delta_2-\delta_1)+\delta_1^{\alpha}[\delta_1+0{,}5(\alpha-1)(\delta_2-\delta_1)]\lambda+\\ +0{,}5(\lambda-1)(\delta_2-\delta_1)+\delta_1=0.\end{cases}\qquad(2)$$

Из (2) находим

$$\lambda=\frac{\delta_1^2(\delta_2-\delta_1)+\alpha^2(\delta_2+\delta_1)[\delta_1+0{,}5(\alpha-1)(\delta_2-\delta_1)]}{\alpha\left\{\alpha(\delta_2+\delta_1)\left[\alpha(\delta_2-\delta_1)+\delta_1^{\alpha}(\delta_1+0{,}5)(\alpha-1)(\delta_2-\delta_1)\right]+0{,}5(\delta_2-\delta_1)[2\delta_1(\delta_2-\delta_1)+\alpha(\alpha-2)(\delta_1+\delta_2)]\right\}}.$$

Обозначим $\dfrac{\delta_1+\delta_2}{2}=\bar{\delta}$. Тогда

$$\lambda=\frac{\delta_1^2\Delta\delta+2\alpha^2\bar{\delta}l(\alpha)}{\alpha\left\{2\alpha\bar{\delta}\left[\alpha\Delta\delta+\delta_1^{\alpha}l(\alpha)\right]+\Delta\delta g(\alpha)\right\}},\qquad(3)$$

где $l(\alpha)=\delta_1+0{,}5(\alpha-1)\Delta\delta$, $\quad g(\alpha)=\delta_1\Delta\delta+\alpha(\alpha-2)\bar{\delta}$.

После подстановки (3) в первое уравнение (2) получим уравнение относительно α

$$\delta_1^{\alpha}\bar{\delta}\alpha^3L^2(\alpha)+0{,}5\alpha g(\alpha)L(\alpha)-\delta_1^2=0,\qquad(4)$$

где $L(\alpha)$ – функция в правой части (4).

Окончательно дисперсия вычисляется в следующем порядке:

1. Вычисление параметра α решением уравнения (4).
2. Вычисление параметра λ по формуле (3).
3. Вычисление дисперсии

$$D = \lambda^{-\frac{2}{\alpha}}\left[\frac{2}{\alpha}\Gamma\left(\frac{2}{\alpha}\right) - \frac{1}{\alpha^2}\Gamma^2\left(\frac{1}{\alpha}\right)\right].$$

Предложенная методика позволяет при известных границах заданной фракции определять параметры закона распределения, необходимые для выбора задаваемых значений управляющих воздействий при регулирования дисперсного состава в процессе производства ДС.

Рассмотрим технологический агрегат распыления суспензии при производстве ферритовых порошков (ТАРФ) с использованием пневматической форсунки двойного распыления [5] как объект управления и определим параметры функции распределения получаемого порошка, которые можно использовать в качестве управляющих воздействий. Как правило, на дисперсный состав получаемого порошка влияют несколько параметров ТАРФ и изменение любого параметра вызывает изменение всей функции распределения, т.е. для такого объекта характерны перекрёстные связи. При этом степень их влияния на функцию распределения получаемого порошка по размерам может отличаться. Применяя теорию чувствительности к задаче автоматизации производства ферритового порошка, выполним анализ воздействий технологических параметров на параметры функции распределения получаемого порошка для оценки того минимума параметров, изменяя которые можно достигнуть максимальной близости к требуемой функции распределения частиц порошка по размерам.

Возможные варианты управляющих воздействий для ТАРФ в процессе получения ферритового порошка, приведены в табл. 1, из которой следует, что степень влияния различных технологических воздействий на параметры функции распределения неодинаковы. Наибольшее влияние на них оказывают расход суспензии и давление сжатого воздуха, которые выбираем в качестве управляющих, а остальные параметры относим к возмущающим. Кроме того, к координатным возмущениям относятся колебания давления воздуха в трубопроводе, а к параметрическим – концентрация суспензии, её температура и вязкость, отрыв сгустков суспензии в случайные моменты времени и т.п.

Таким образом, на основании предложенной целевой функции для системы регулирования дисперсного состава ДС в процессе производства порошковых материалов по известной двухпараметрической функции распределения порошка по размерам предложен интегральный критерий по дисперсному составу и методика определения параметров функции распределения, которые могут быть использованы в качестве параметров необходимых для задания управляющих воздействий. Для ТП получения ферритового порошка распылением пневматической форсункой в качестве управляющих воздействий для получения требуемой функции распределения следует выбрать изменение давления сжатого воздуха и расход суспензии, подаваемой на распыление. С целью уменьшения влияния возмущающих воздействий остальные технологические параметры следует стабилизировать.

Таблица 1 – Управляющие воздействия для ТАРФ
(при логнормальном законе распределения частиц порошка по размерам)

Возможные управляющие воздействия в ТП распыления пневматической форсункой	Параметры* функции распределения	Степень влияние, ≈ %		Характеристики переменных
		δ_{50},	σ	
Давление сжатого воздуха, подаваемого в каналы форсунки, $P_в$	**δ_{50}, σ**	**28**	**21**	**Управляющее воздействие**
Температура сжатого воздуха, подаваемого на форсунку, $T_{гф}$	δ_{50}, σ	9	10	Возмущение
Температура суспензии, подаваемой, на распыление, $T_{СР}$	δ_{50}, σ	7	11	Возмущение
Давление воздуха в распылительной камере, $P_{РК}$	σ, δ_{50}	10	7	Возмущение
Плотность суспензии, зависящая от химического состава компонентов, ρ_a	δ_{50}, σ	5	13	Возмущение
Расход суспензии, подаваемой на распыление, F_c	**σ, δ_{50}**	**26**	**18**	**Управляющее воздействие**
Температура воздуха в распылительной камере, $T_{РК}$	δ_{50}, σ	6	8	Возмущение
Диаметр кольцевого зазора между каналами подачи воздуха и суспензии, $D_{КЗ}$	σ, δ_{50}	19	12	Возмущение

*Порядок расположения параметров соответствует степени влияния на параметры функции распределения.

Предложенные, целевая функция и интегральный критерий по дисперсному составу порошков, могут быть использованы для различных ТП производства порошковых материалов.

Литература

1. *Технология* электрокерамики / Под ред. Г.Н. Масленниковой. – М.: Энергия, 1974. – 224 с.
2. *Белинская Г.В., Выдрик Г.А.* Технология электровакуумной и радиотехнической керамики. – М.: Энергия, 1977. – 335 с.
3. *Бабич Э.А., Улановский Б.М.* Технология производства ферритов и радиокерамики: Учеб. пособие для техн. училищ. – М.: Высшая школа, 1984. – 223 с.
4. *Поляков А.А., Круглицкий Н.Н.* Распылительная сушка в технологии радиоэлектронных материалов. – М.: Радио и связь, 1982. – 72 с.
5. *Коузов П.А.* Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельчённых материалов. – 3-е изд., перераб. – Л.: Химия, 1987. – 264 с.
6. *Кафаров В.В, Дорохов И.Н., Арутюнов С.Ю.* Системный анализ процессов химической технологии. Процессы измельчения и смешения сыпучих материалов. – М.: Наука, 1985. – 440 с.
7. *Иткин Г.Е.* Контроль крупности минерального сырья автоматическими гранулометрами. – М.: Недра, 1986. – 120 с.
8. *Монтік П.Н., Тігарєв А.М.* Система керування дисперсним складом порошкових матеріалів // Наукові праці Одес. нац. акад. харч. техн. – Одеса, 2003. – Вип. 25.– С. 234–237.