

**ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ
РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОННЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ**

П. С. МОРОЗ

(Представлена научным семинаром кафедры экономики)

Проведенные исследования радиометрического метода регистрации тормозного излучения электронных ускорителей (бетатронов) продемонстрировали потенциальные возможности метода и указали пути его реализации [1, 2].

Рассматривались и решались задачи по выбору отдельных параметров дефектоскопа и исследовались метрологические характеристики разработанных дефектоскопов. Исследователи в первую очередь пытались создать работоспособные системы контроля и за критерий эффективности принимали чувствительность, производительность, стоимость контроля. При этом первоначально производился выбор источника тормозного излучения, а потом разрабатывалась система регистрации.

Накопленный теоретический и практический материал показал, что, во-первых, могут быть созданы различные типы электронных ускорителей, такие как бетатроны, микротроны и линейные ускорители, в широком и перекрываемом диапазоне параметров пучка тормозного излучения. При этом их стоимость значительно зависит от параметров пучка. Во-вторых, существуют различные системы анализа информации о дефектах, например, аналоговые, дискретные. Одни из них позволяют более качественно обрабатывать информацию, т. е. выявлять меньшие дефекты, но, как правило, эти системы более сложны и дороги.

Учитывая противоречия между такими критериями, как чувствительность, производительность, стоимость контроля, которые наиболее часто применяют на уровне чисто инженерных исследований, на стадии проектирования и разработки промышленных систем контроля возникает вопрос: какими техническими возможностями, например, по чувствительности, производительности должна обладать система контроля, чтобы эффект был максимальный?

Анализ функций методов неразрушающего контроля показал, что проблема проектирования новых оптимальных систем контроля и их внедрения связана с понятием интегрального качества продукции. Указывается [3], что выбор оптимальной системы контроля связан с оптимальными нормами на выявление дефектов и может быть произведен при совместном анализе целевой отдачи и затрат на контроль.

Учитывая, что моделирование и исследование целевой отдачи является самостоятельной задачей и что разработка радиометрических систем контроля находится на лабораторной стадии, предлагается ре-

шению следующая задача: разработать методику технико-экономической оптимизации радиометрической системы контроля по критерию минимума приведенных затрат и расчета основных параметров при заданных чувствительности, производительности, толщине контролируемого материала и геометрии контроля.

Задача решается методом математического моделирования. Наиболее сложным этапом является математическое описание взаимосвязей между параметрами системы, существование которых подтверждается многочисленными экспериментами и теоретическими представлениями.

Для исследования выбрана аналоговая дифференциальная схема измерения, реализованная в экспериментальных установках [1].

Такая принципиальная схема состоит из двух каналов, каждый из которых имеет гамма-преобразователь (сцинтиллятор, ФЭУ), схемы вычитания или отношения интегратора, усилителя и регистрирующего прибора. Сигналы с гамма-преобразователей подаются в схему вычитания или отношений, и с выхода обработанный сигнал поступает на инерционное звено-интегратор с постоянными параметрами.

В результате анализа прохождения сигнала от дефекта и шума, вызываемого статистическими флуктуациями интенсивности, получено следующее условие выявления сигнала от дефекта на фоне шумов:

$$\begin{aligned}
 M = \max \left\{ \left[\left[\frac{\mu_{\text{эфф}} \mathcal{V}_g}{S_{\kappa} n_1} (1 - e^{-\tilde{\tau}_1}) \sum_{j=1}^{n_1} j e^{-(n_1-j)(\delta_1 - \delta_2)} \right] e^{-n_2(\tilde{\tau}_1 + \delta_2)} + \right. \right. \\
 \left. \left. + \frac{\mu_{\text{эфф}} \mathcal{V}_g (1 - e^{-\tilde{\tau}_1}) [1 - e^{-n_2(\tilde{\tau}_1 + \delta_2)}]}{S_{\kappa} [1 - e^{-(\delta_1 + \delta_2)}]} \right] e^{-n_3(\tilde{\tau}_1 + \delta_2)} + \right. \\
 \left. + \frac{\mu_{\text{эфф}} \mathcal{V}_g}{S_{\kappa}} (1 - e^{-\tilde{\tau}_1}) \sum_{j=0}^{n-1} e^{-j(\tilde{\tau}_1 + \delta_2)} + \right. \\
 \left. + \frac{\mu_{\text{эфф}} \mathcal{V} (e^{-\tilde{\tau}_1} - 1)}{S_{\kappa} n_3} \sum_{j=n_3}^1 j e^{-(n_3-j)(\delta_1 + \delta_2)} \right\} / \\
 \left| \sqrt{\delta_a^2 + \left(\delta_n + \frac{2}{N} \right) \left\{ \frac{(1 - e^{-n_2(\delta_1 + \delta_2)}) (1 - e^{-\delta_1})}{1 - e^{-(\delta_1 + \delta_2)}} \right\}^2} \right| \geq Z,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где $\mu_{\text{эфф}}$ — эффективный коэффициент поглощения, см^{-1} ; \mathcal{V}_g — объем выявляемого дефекта, см^{-3} ; S_{κ} — площадь коллиматора, см^2 ; n_1 , n_2 , n_3 — соответственно число импульсов за время входа, нахождения дефекта в поле коллиматора и выхода и являются функцией скорости контроля; δ_1 , δ_2 — соответственно отношение длительности импульса к постоянной времени заряда и паузы к постоянной времени разряда; δ_a — аппаратурная составляющая погрешности; δ_n — флуктуационная составляющая погрешности, вызываемая неидентичностью каналов; n_s — среднее число последовательных импульсов в случайном импульсном процессе, поступающем на вход интегратора, превышающих среднеквадратичное отклонение; \bar{N} — среднее число гамма-квантов, падающих в коллиматор за импульс, которое является функцией параметров пучка, размеров коллиматора и параметров поглотителя; E_m — максимальная энергия в спектре пучка тормозного излучения, Мэв; P_x — мощность экспозиционной дозы, р/мин ; d — толщина поглотителя, см ; F — фокусное расстояние, м ; Z — порог, определяющий вероятность обнаружения дефектов.

Выражение (1), представляющее собой упрощенную математическую модель одноканального дефектоскопа, является неявной и недифференцируемой функцией по таким параметрам, как объем дефекта, размеры коллиматора, параметры интегратора, поэтому исследование проведено численным методом, которое показало, что при заданной вероятности обнаружения дефектов и прочих постоянных условиях существуют оптимальные значения постоянной времени заряда интегратора и длины коллиматора, при которых выявляемый дефект минимален. При этом постоянная времени разряда выбирается из требований по разрешающей способности.

Сравнение результатов эксперимента и расчетов по выражению (1) дало удовлетворительные результаты, что показывает правомочность применения этой модели в дальнейших исследованиях.

Вследствие малой производительности одноканального дефектоскопа, случайного расположения дефекта в материале и возможности частичного попадания его в поле коллиматора разрабатываются принципы построения многоканального приемника излучения, которые заключаются в следующем: число сцинтилляционных счетчиков, размеры коллиматоров, их расположение должны быть такими, чтобы, во-первых, перекрыть зону контроля, во-вторых, чтобы минимально выявляемый дефект при случайном расположении в объеме материала контролируемой зоны полностью попал, по крайней мере, в поле коллиматора одного канала и, в-третьих, детектор излучения должен перекрываться пучком тормозного излучения.

Математически эти условия описываются следующими равенствами:

$$\begin{aligned} b_1 &= \frac{d_k}{R} + a; \\ d_k &= 1,5\sqrt{b^2 + b_1^2} + 2h; \\ (Rd_k)^2 &= F^2tg^2 110/E_m - \frac{B^2}{4}, \end{aligned} \quad (2)$$

где d_k — диаметр кристаллов вместе с боковой защитой, см; h — толщина боковой защиты кристалла, см; B — ширина зоны контроля, см; R — число рядов сцинтилляционных счетчиков; b , b_1 — длина и ширина коллиматора, см; a — сторона кубического дефекта, см.

Выражение (2) позволило определить число сцинтилляционных счетчиков

$$n_c = \frac{2R}{d_k} \left(B + \frac{d_k - b_1}{2} \right) \quad (3)$$

и капитальные затраты на приемник излучения

$$K_{пр} = n_c (\Pi_{\phi} + \Pi_{кр}) + C_3 + C_n, \text{ руб}, \quad (4)$$

где Π_{ϕ} — преискурантная цена ФЭУ, руб/шт.; $\Pi_{кр}$ — преискурантная цена кристалла, руб/шт; C_3 — стоимость материала защиты, руб; C_n — постоянная составляющая стоимости приемника, руб.

Полученные укрупненные стоимостные характеристики источника излучения (бетатрона) [3] и приемника (4) позволили записать приведенные затраты как функцию ряда переменных

$$Z_{пр} = \frac{Z_{пл}}{W} + \frac{n_c \Pi_{\phi}}{T_1 W} + \frac{(K_u + K_{пр})(P_a + E_n)}{T_1 W}, \frac{\text{руб}}{\text{м}^2}, \quad (5)$$

где W — производительность контроля, м²/ч; $Z_{пл}$ — часовая зарплата операторам, руб/ч; T_1 — гарантийный срок службы ФЭУ, ч; K_u — сто-

имость источника (бетатрона), руб; P_a — норма амортизации; E_n — нормативный коэффициент эффективности; T_1 — годовое число часов использования системы контроля, ч.

Совокупность целевой функции в виде приведенных затрат (5) системы равенств и неравенств представляет собой технико-экономическую модель, отражающую основные технические и экономические зависимости между параметрами источника тормозного излучения, параметрами многоканального сцинтилляционного приемника и производственными требованиями.

Математическая формулировка задачи комплексной оптимизации радиометрической системы контроля может быть записана в следующем виде: необходимо минимизировать нелинейную функцию цели — приведенные затраты

$$Z_{пр} = f(K_u, K_{пф}, W(\tau, B)) \quad (6)$$

при наличии зависимостей

$$\begin{aligned} K_u &= f(E_m, P_x, \text{тип ускорителя}), \\ K_{пр} &= f(n_c), \\ n_c &= f(R, d_k, B), \end{aligned} \quad (7)$$

$$M = f(E_m, P_x, \delta_1, F, b, b_1, v_g, v, d),$$

наличии ограничений в виде равенств

$$\begin{aligned} f(F, R, d_k, B, E_m) &= 0, \\ f(b_1, d_k, R, a) &= 0, \\ f(d_k, b, b_1) &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

неравенств

$$M \geq Z,$$

когда заданы такие начальные условия, как минимально выявляемый дефект, толщина поглотителя, скорость и ширина зоны контроля.

На параметры пучка тормозного излучения, фокусное расстояние и число рядов сцинтилляционных счетчиков наложены технические и экономические ограничения.

Сформулированная задача является сложной, нелинейной многофакторной, экстремальной задачей, которая решалась численным методом и при поиске экстремума целевой функции применен метод по координатного спуска и слепой поиск по дискретно изменяющимся параметрам.

Разработанный алгоритм позволяет с помощью ЭЦВМ проводить расчет оптимальных параметров и режимов радиометрических дефектоскопов. Путем варьирования начальными условиями толщиной поглотителя, чувствительностью (объемом дефекта), скоростью контроля и энергией тормозного излучения проведено исследование поведения минимума приведенных затрат. В качестве примера в табл. 1 представлены значения основных параметров оптимальных радиометрических систем контроля.

Анализ расчетного материала показал, что на сложность радиометрической системы контроля наиболее значительно влияют объем выявленного дефекта и толщина поглотителя.

Анализ модели и расчетных результатов, полученных при исследовании одноканального дефектоскопа, когда ширина коллиматора равна ширине дефекта, показал, что уменьшение длины коллиматора до равенства с длиной дефекта ведет к увеличению относительного значе-

Таблица 1

 $E_m = 15 \text{ Мэв}, v = 50 \text{ см/мин}$

| $a, \text{ см}$ | $Z_{\text{пр}}, \text{ руб/м}^2$ | $v, \text{ см}$ | $v_1, \text{ см}$ | δ_1 | R | $d_{\text{к}}, \text{ см}$ | $P_{\text{х}}, \text{ р/мин}$ | $n_{\text{с}}$ | $K_{\text{пр}}, \text{ руб}$ | $K_{\text{ц}}, \text{ руб}$ | $F, \text{ м}$ |
|-----------------|----------------------------------|-----------------|-------------------|------------|-----|----------------------------|-------------------------------|----------------|------------------------------|-----------------------------|----------------|
| | $d=20\text{см}$ | | | | | | | | | | |
| 0,4 | 1,52 | 0,3 | 1,75 | 0,2 | 3 | 4,1 | 25 | 32 | 12·10 | 3·10 | 1,26 |
| 0,6 | 0,95 | 0,5 | 5,27 | 0,25 | 2 | 9,4 | 54 | 10 | 5,7·10 | 5,9·10 | 1,69 |
| 1,2 | 0,5 | 0,7 | 7,7 | 0,015 | 2 | 13 | 1 | 8 | 5·10 | 5·10 | 2,22 |
| | $d=36\text{см}$ | | | | | | | | | | |
| 0,4 | 4 | 0,3 | 1,2 | 0,074 | 4 | 3,3 | 270 | 52 | 18·10 | 28·10 | 1,31 |
| 0,6 | 1,35 | 0,6 | 2,2 | 0,04 | 3 | 4,8 | 26 | 26 | 10,6·10 | 31·10 | 1,4 |
| 1,2 | 0,51 | 1,1 | 7,8 | 0,03 | 2 | 13 | 1,8 | 8 | 5500 | 5800 | 2,26 |
| | $d=50\text{см}$ | | | | | | | | | | |
| 0,4 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 0,6 | 3,79 | 0,7 | 1,6 | 0,03 | 4 | 4 | 290 | 42 | 15·10 | 3·10 | 1,51 |
| 1,2 | 0,77 | 1,1 | 7,83 | 0,03 | 2 | 13 | 38 | 8 | 5000 | 44·10 | 2,26 |

ния сигнала от дефекта, однако уменьшает время пребывания дефекта в поле коллиматора и ведет к увеличению статистической составляющей шума за счет уменьшения числа гамма-квантов, попадающих в коллиматор за импульс. Дальнейшее уменьшение длины коллиматора не ведет к увеличению относительного значения сигнала от дефекта. Статистическая составляющая шума может быть уменьшена за счет уменьшения постоянной времени заряда и увеличения числа гамма-квантов, попадающих в поле коллиматора за импульс, которое пропорционально мощности экспозиционной дозы и площади коллиматора. Увеличение постоянной времени заряда от оптимального значения ведет к уменьшению шума до аппаратной погрешности, а амплитуда сигнала на выходе интегратора стремится к нулю. Наоборот, с уменьшением постоянной времени заряда амплитуда сигнала на выходе интегратора стремится к относительному значению сигнала от дефекта, а шум — к сумме аппаратной и статистической погрешности.

В многоканальных радиометрических дефектоскопах увеличение толщины поглотителя при выявлении одного и того же объема дефекта или при уменьшении выявляемого дефекта на одной и той же толщине поглотителя ведет к увеличению числа дефектов в приемнике излучения и мощности экспозиционной дозы, т. е. к увеличению стоимости как приемника, так и источника излучения.

Таким образом, разработанная методика комплексной оптимизации радиометрических дефектоскопов показывает путь создания оптимальных моделей с учетом конкретных условий их применения. Разработка аналогичных моделей для других типов источников и методов обработки информации, их исследования позволили бы определять области эффективного применения различных методов измерения.

Отсутствие стоимостных характеристик для микротронов и линейных ускорителей не позволяет провести сравнительный анализ их эффективности.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Горбунов, А. В. Покровский. Дефектоскопия. 1965, 5, 38.
 2. В. И. Горбунов, А. В. Покровский, А. К. Темник. Дефектоскопия, 1961, 1.
 3. В. И. Горбунов, П. С. Мороз, А. В. Покровский. Дефектоскопия. 1971, 3, 117.
-