

УДК 681.513

А.Н. СКАКОВСКАЯ

Сумський державний університет, Україна

ФУНКЦИОНАЛЬНО-СТАТИСТИЧЕСКИЙ МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ РАСТРОВЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ МИКРОСКОПОМ

Рассмотрена проблема разработки новой модели, метода анализа и синтеза системы управления растровым электронным микроскопом, основанной на теоретико-множественной модели информационных и управляющих потоков в интеллектуальных системах управления растровых электронных микроскопов и методах классификации изображений.

растровый электронный микроскоп, интеллектуальная система, фокусировка, изображение

Введение

Одним из чрезвычайно эффективных и наглядных, но вместе с тем технически и теоретически сложных методов исследования количественных и качественных параметров разнообразных объектов исследования является метод растровой электронной микроскопии и рентгеновского микроанализа.

Технологический процесс настройки растрового электронного микроскопа (РЭМ) на необходимые параметры для конкретного исследования характеризуется сложным взаимодействием оператора с технологическим объектом управления. Формирование управляющих воздействий в таких условиях сопряжено с контролем большого количества различных параметров функционирования РЭМ. Кроме того, процесс управления значительно усложняется необходимостью сбора и обработки большого объема информации о техническом состоянии объекта исследования и системы управления. Поэтому задача создания специальных систем управления РЭМ, которые относятся к интеллектуальным, но не исключают участия человека, является актуальной.

1. Методы фокусировки изображения в РЭМ

К недостаткам растрового электронного микроскопа следует отнести следующие проблемы, связанные с его *управлением* [1 – 3]: ограничения раз-

решения; высокая техническая сложность существующих методов фокусировки исследуемого образца, обусловленная особенностями оптико-измерительной системы, наличием субъективных факторов окружающей среды и состояния зрения исследователя [1]; затруднения при изучении диэлектриков, радиационные повреждения некоторых материалов в процессе исследования; несовершенства электронно-оптической системы (хроматическая, сферическая аберрации и астигматизм), артефакты.

Конечным этапом электронномикроскопического исследования является получение качественного снимка. Поэтому главной задачей оператора является получение максимально резкого изображения, которое при данном разрешении прибора определяется качеством фокусировки [2].

Изображение является точно сфокусированным, когда область зондирования пучком на образце (принимая во внимание влияние области взаимодействия, вклад которой в зондируемую область образца может быть основным) меньше, чем размер элемента изображения [1].

Для получения значений точной фокусировки применяются следующие способы наводки изображения на резкость, описанные в работе [5].

Фокусировка с помощью корректора фокусировки. Наводка на резкость изображения производится при пропускании переменного тока через отк-

няющие катушки, расположенные между конденсорным блоком и объективной линзой. В результате этого пучок пересекает объект в пределах некоторого угла. Это эквивалентно увеличению апертуры осветительной системы, а, следовательно, и уменьшению глубины резкости при фокусировке. После наводки на резкость корректор выключается, и полученное изображение регистрируется на фотопластинке.

Фокусировка изменением апертуры осветительной системы. При работе на малых увеличениях наводку на резкость осуществляют после удаления сцентрированной осветительной диафрагмы при сфокусированном вторым конденсором электронном пучке. Глубина резкости становится минимальной, и легче достичь значения точного фокуса. Затем вводится осветительная диафрагма и пучок расфокусируется вторым конденсором.

Фокусировка по минимальному контрасту. Если апертурная диафрагма удалена, и ток линзы принимает значение вблизи точного фокуса, то в фокусе изображение имеет минимальный контраст. Определенный по этому критерию фокус близок к оптимальному. Однако большая непрозрачная частица становится при установке фокуса чернее даже без диафрагмы.

Перемещение объекта после фокусировки. Можно сфокусировать изображение по резким деталям и затем, передвинув образец, сфотографировать нужный участок. Этот метод необходимо применять *осторожно*, т.к. он требует чрезвычайно высокой точности передвижения держателя объектов по горизонтали и установки предметной сетки. Его рекомендуется применять для объектов, чувствительных к электронному пучку.

Фокусировка изображения на увеличениях свыше 20000 [5]. Кольца Френеля являются хорошим критерием фокусировки, когда получают изображения с большим увеличением. Сравнительно легко уловить

момент, когда кольца исчезают, что соответствует точной фокусировке изображения объекта.

Но необходимо иметь в виду, что наблюдение и точная фокусировка изображения в значительной степени зависят от остроты зрения оператора. Способность глаза к обнаружению и восприятию мелких деталей изображения зависит от их размеров и формы, контраста, от степени адаптации глаза, от цвета и интенсивности свечения экрана. С уменьшением контраста и яркости изображения острота зрения понижается [5].

Известен *способ автоматической фокусировки РЭМ по изображению* исследуемого образца [3], по которому путем последовательного сканирования потоком вторичных электронов рельефа поверхности исследуемого объекта формируют матрицу яркости изображения, которое фокусируется. Оценивают фокусировку электронного изображения определением значения автокорреляционной функции видеосигнала. Запоминают максимальное значение сигнала, который отвечает сфокусированному изображению, а при наличии отклонения от максимального значения, дефокусировку изображения устраняют изменением величины тока фокусирующей линзы.

Однако, при использовании такой системы, построенной на принципе вычисления автокорреляционной функции видеосигнала, необходимо квантование его значений с частотой порядка десятков килогерц. Но даже при условии безинерционности экстремального регулятора невозможно изменять с такой частотой ток в обмотке электромагнита фокусирующей линзы, которая является фильтром нижних частот и имеет значительную инерционность, что приводит к задержке управляющего сигнала. Снижение частоты квантования видеосигнала приводит к увеличению шага корреляции, что снижает точность вычисления автокорреляционной функции и может вызвать срыв процесса автофокусировки в целом. Итак, рассмотренный способ автофокуси-

ровки РЭМ по изображению исследуемого объекта нуждается в усовершенствовании.

Сравнительный анализ способов фокусировки изображения показал, что для неорганических, металлических и биологических образцов различного вида: массивных образцов, малых частиц, тонких пленок, срезов и поверхностей излома необходимы различные способы фокусировки изображения.

Исследователь должен хорошо представлять, какие методы он использует и какие у них ограничения. Качество изображения зависит от исследуемого образца и выбора рабочих условий настройки микроскопа (тока, ускоряющего напряжения, рентгеновской линии).

Поэтому необходимость адаптации к конкретным типам образцов и рабочих условий настройки микроскопа требуют создания специальной системы управления, способной распознать изображение оптимального качества (максимально резкое) и оценить текущее функциональное состояние микроскопа с целью его коррекции, но не исключаяющей из контура участия человека.

Обобщенный анализ способов фокусировки изображения в РЭМ [1 – 3, 5 – 8] показал, что комплекс средств формирования, регистрации, преобразования и анализа измерительной информации, включающий в себя исследуемую систему, оптическую измерительную установку, формирующую требуемое изображение, регистрирующую часть и анализирующую часть, целесообразно рассматривать в совокупности как сложную оптико-измерительную регистрирующую систему с множеством неопределенностей [1].

Итак, возникает необходимость в постепенной замене существующих методов управления РЭМ на интеллектуальные системы управления (ИСУ) слабо формализованными процессами, основанные на классификационном подходе.

С целью создания такой системы рассмотрим теоретико-множественную модель ИСУ РЭМ.

2. Теоретико-множественная модель ИСУ РЭМ

Задача управления такой системой заключается в поиске оптимального варианта выбора управляющего воздействия из множества альтернатив и оптимизации режимов работы системы с учетом многочисленных ограничений.

На рис. 1 представлена модель процесса преобразования информации в РЭМ, которая отражает реальные процессы, происходящие в микроскопе, с учетом мнения экспертов и передачи опыта ручного управления микроскопом автоматизированной системе с требуемой в исследованиях точностью.

Оптимальное значение тока i_3 формирует фокус изображения. Информационное множество об образце содержит характерные для него константы, влияющие на глубину фокуса F либо разрешающую способность RS . Видеоизображение V формирует высокочастотную составляющую, соответствующую текущим настройкам. Итерационный процесс настройки ИСУ завершается при достижении оптимальных для конкретных испытаний значений F^* или RS^* :

$$\begin{aligned} F &\rightarrow F^* ; \\ RS &\rightarrow RS^* . \end{aligned} \quad (1)$$

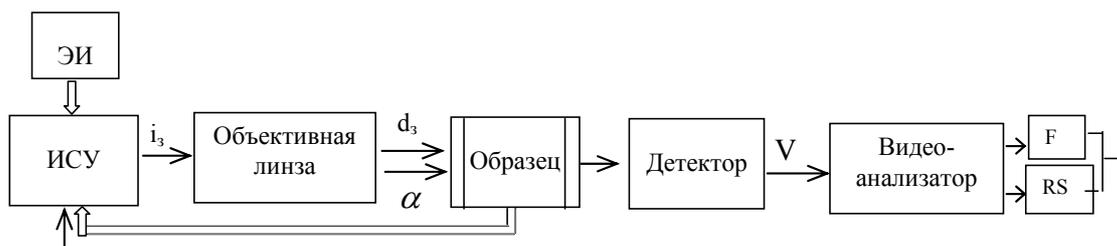


Рис. 1. ИСУ РЭМ

Тогда целевая функция имеет вид:

$$\Phi(F) = \min_k \int_0^k \left\| \varepsilon \left(F^* - F(\alpha) \right) \right\| d\alpha.$$

Задача синтеза такой ИСУ состоит в определении отображения:

$$\begin{aligned} R1: T \times H \times P &\rightarrow C_k, \\ R2: M \times i_{zk} \times d_{zk} \times \alpha_k \times f_k &\rightarrow F, \\ R3: C \times d_{zk} \times D_l &\rightarrow RS, \end{aligned} \quad (2)$$

где $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ – топография исследуемого образца; $H = \{Z, K\}$ – химический состав элемента, Z – атомный номер; K – кристаллическая решетка; $P = \{\text{электрическое, магнитное}\}$ – поверхностные поля; $C = [0, \dots, 1]$ – контраст. Отображение $R1$ формирует оптимальное значение контраста. Отображение $R2$ формирует оптимальную глубину фокуса F , которая зависит от выбранного увеличения $M = \{10 - 100000\}$, тока зонда i_{zk} , диаметра зонда d_{zk} , апертурного угла α_k и фокусного расстояния f_k . $R3$ формирует оптимальное разрешение RS , зависящее от контраста C , диаметра зонда d_{zk} и элемента изображения D_l . Здесь k – шаг квантования. ЭИ (эталонное изображение) – максимально резкое изображение, которое при данном разрешении прибора определяет оптимальные значения F^* или RS^* . С помощью ЭИ передается опыт ручной фокусировки на автоматизированную систему, что позволяет применить классификационный подход для автонастройки РЭМ по изображению исследуемого образца. Такая модель является приспособленной к естественному для лица, принимающего решения, языку, а также имеет возможность моделировать субъективные методы преобразования информации в РЭМ.

Рассмотрим применение описанной теоретико-множественной модели ИСУ для автофокусировки РЭМ в рамках метода функционально-статистических испытаний (МФСИ) [4], основанного на оценке информационной способности системы распознавания образов.

3. Автофокусировка РЭМ по изображению исследуемого образца

Пусть X_H^0 – класс, характеризующий наивысшую функциональную эффективность E_{\max} РЭМ, описанную отображениями (1) и (2). Дан вектор параметров настройки $g = \langle g_1, \dots, g_j, \dots, g_J \rangle$, соответствующие ограничения на них $R_j(g_1, \dots, g_J) \leq 0$ и класс X_0 , который характеризует начальное (расфокусированное) состояние РЭМ и принимается за базовый. Требуется в рамках заданной оперативности за S шагов настройки перевести РЭМ из класса X_0 в класс X_H^0 при условии достижения максимального значения критерия функциональной эффективности (КФЭ) $E_{\max} = \max_{\{S\}} E(S)$, где $E(S)$ – значение КФЭ на S -м шаге настройки.

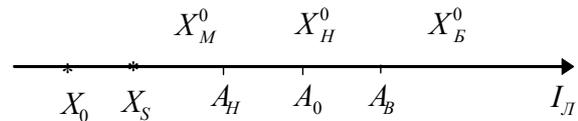


Рис. 2. Области настраиваемого параметра

Идея автофокусировки РЭМ в рамках МФСИ заключается в вычислении КФЭ между начальным (базовым) расфокусированным изображением X_0 и текущим – X_S , которое устанавливается на S -м шаге классификационной настройки, сравнении его значения с предыдущим и принятия решения об изменении управляющего параметра – тока фокусирующей линзы I_L на заданную величину. Процесс классификационной настройки длится до тех пор, пока значение тока I_L не обеспечит приемлемой с практической точки зрения фокусировки изображения (соответствующего эталонному).

Реализация рассмотренного алгоритма осуществлялась при автофокусировке серийного микроскопа РЭМ-103 производства Selmi (г. Сумы, Украина) [5], для которого постоянный ток обмотки объективной линзы изменялся в диапазоне 0,3 – 2,0 А.

Эксперименты показали, что в области экстремального значения настраиваемого параметра может возникать колебательный процесс, связанный с тем, что значение тока переводит РЭМ в другую область фокусировки. Для устранения этого недостатка после выхода РЭМ в рабочий режим для класса X_H^0 определялись нормированные допуски A_H и A_B для параметра настройки, которые для тока $I_{Л}$ равны 1,275А и 1,284А соответственно. Процесс настройки заканчивался, когда значение тока $I_{Л}$ попадало в область X_H^0 .

Таким образом, предлагаемый способ автофокусировки РЭМ позволяет путем итерационного поиска максимума разнообразия между базовым расфокусированным изображением и текущим целенаправленно изменять ток объективной линзы, добиваясь требуемой фокусности изображения. Вычисление информационного КФЕ в отличие от автокорреляционной функции [6] позволяет уменьшить почти на порядок объем выборки, что повышает быстродействие автофокусировки.

Заклучение

С учетом этого важной научно-технической задачей является разработка новых моделей, методов анализа и синтеза систем управления, основанных на теоретико-множественной модели информационных и управляющих потоков в ИСУ РЭМ и методах классификации изображений.

Указанная проблема может быть реализована решением следующих задач:

1. Разработка теоретико-множественной и функционально-статистической модели информационных и управляющих потоков в ИСУ РЭМ.
2. Разработка метода фокусировки РЭМ на основе классификации изображений и методологии «обучение-экзамен».
3. Разработка методики автофокусировки РЭМ с учетом субъективного опыта оператора.

4. Разработка методики анализа рентгеновских спектров при энергодисперсионной спектрографии, состоящей в учете требований к уровню квалификации оператора.

5. Разработка методики распознавания электронограмм для ПЭМ-125.

Предложенный в п. 3 подход позволяет решать перечисленные задачи аналогичным образом.

Литература

1. Шеридан Т.Б., Феррелл У.Р. Системы человек-машина: модели обработки информации, управления и принятия решений человеком-оператором: Пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1980. – 400 с.
2. Пилянкевич А.Н., Климовицкий А.М. Электронные микроскопы. – К.: Техніка, 1976. – 165 с.
3. Авторское свидетельство СССР № 942189 (51)М. Кл. Н 01J 37/21 от 07.07.82. Устройство автоматической фокусировки изображения в растровом электронном микроскопе / Веприк В.Г., Давиденко М.Д., Капличный В.Н. и др. – Оpubл. 09.07.82. Бюл. №25. – 3 с.
4. Краснопопсовський А.С., Скаковська А.М. Автофокусування електронного мікроскопа за зображенням // Оброблення сигналів і зображень та розпізнавання образів: Праці п'ятої Всеукраїнської міжнародної конференції «Укробраз-2000». – К.: МННЦІТіС, 2000. – С. 183-186.
5. Деклараційний патент на винахід № 2003065957; 64570 А, МКІ Н-01J37/21 від 26.06.2003; Спосіб автоматичного фокусування електронного мікроскопа за зображенням досліджуваного об'єкта / Краснопопсовський А.С., Скаковська А.М. – Оpubл. 16.02.2004. Бюл. № 2. – 4 с.

Поступила в редакцію 29.05.2007

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф. А.Н. Черноус, Сумский государственный университет, Сумы.