

9. Sokolovskiy Yu. B. Vetrovye energeticheskie ustanovki [Wind power plants]. *Vestnik doma uchenykh* [Bulletin of the House of Scientists]. Haifa (Israel), 2014, vol. 32, pp. 80–87.

10. Rotkin V., Sokolovsky Y. Energy efficiency of bladed wind turbine. Optimization model. *Journal Scientific Israel- Technological Advantages*, 2016, vol. 18, no. 2, pp. 45–61.

11. Rotkin V., Sokolovsky Y., Sokolovsky A., Frolov E. New variants of wind energy plants. *Journal Scientific Israel – Technological Advantages*, 2016, vol. 18, no. 4, pp. 39–50.

12. Sokolovsky Y., Rotkin V. *Theoretical and technical basis for the optimization of wind energy plants*. Lulu Press, Inc., USA, 2017. 160 p.

DOI 10.21672/2074-1707.2020.49.4.121-131

УДК 004:9

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, ПРЕДНАЗНАЧЕННАЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОННОЙ БИБЛИОТЕКИ: СИНТЕЗ ЧИСЛА ГРАДАЦИЙ ПРОСТРАНСТВА СОСТОЯНИЙ

Статья поступила в редакцию 28.01.2020, в окончательном варианте –16.02.2020.

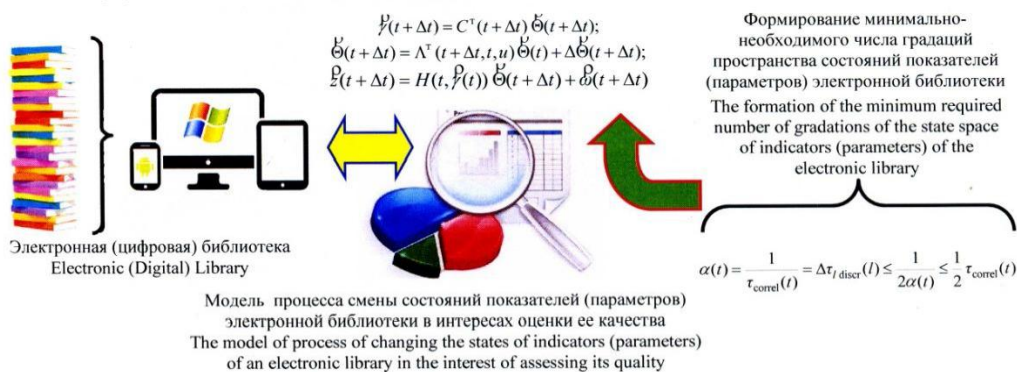
Крюкова Елена Сергеевна, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, 194064, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, пр. Тихорецкий, 3, адъюнкт, e-mail: e.krukovaab9@yandex.ru

Параицук Игорь Борисович, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, 194064, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, пр. Тихорецкий, 3, доктор технических наук, профессор, e-mail: shchuk@ Rambler.ru

Показано место электронных библиотек в информационно-образовательном пространстве и системе образования России. Охарактеризованы особенности математической модели, предназначенной для оценки качества электронной библиотеки. Рассмотрены этапы алгоритма отыскания минимально-допустимых значений приращений (числа градаций) переменных состояния, описывающих динамику изменения значений показателей качества электронной библиотеки, а также поиска оптимальных временных интервалов их дискретизации. Предложен алгоритм определения оптимального числа градаций пространств состояния для построения модели электронной библиотеки. Алгоритм учитывает требования к точности (величине отклонения) значения критерия оценки качества, к устойчивости основных оперативно-технических показателей электронной библиотеки относительно возмущающих воздействий, а также текущие требования пользователя к математической сложности оценки качества объекта такого класса. Сформулированы аналитические выражения для нахождения допустимой погрешности оценивания значения l -го показателя качества, коэффициента чувствительности и временного интервала дискретизации компонент векторного показателя качества электронной библиотеки. Предложенные подходы позволяют сформулировать достоверную (адекватную задачам управления) математическую модель в интересах оценки качества электронной библиотеки, открывают новые возможности для моделирования состояний библиотек и прогнозирования их качества, углубляют наши представления о математической природе процесса смены состояний сложных управляемых информационно-технических систем и процессов.

Ключевые слова: электронная библиотека, пространство состояний, показатель качества, оценивание, математическая модель, процесс смены состояний, марковская цепь, уравнение состояния, уравнение наблюдения, минимальное число градаций, переменные состояния, погрешность, временные интервалы дискретизации, требования к точности моделирования, управление качеством

Графическая аннотация (Graphical annotation)



MATHEMATICAL MODEL FOR ESTIMATING THE QUALITY OF ELECTRONIC LIBRARY: SYNTHESIS OF THE NUMBER OF GRADATIONS OF SPACE STATES

The article was received by the editorial board on 30.01.2020, in the final version – 16.02.2020.

Kryukova Elena S., Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, 3 Tikhoretskiy Ave., St. Petersburg, 194064, Russian Federation, postgraduate student, e-mail: e.kkrukovaa69@yandex.ru

Parashchuk Igor B., Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, 3 Tikhoretskiy Ave., St. Petersburg, 194064, Russian Federation, Doct. Sci. (Engineering), Professor, e-mail: shchuk@rambler.ru

The place of electronic libraries in the information and educational space and the education system of Russia is shown. The features of a mathematical model for evaluating the quality of an electronic library are characterized. The stages of the algorithm for finding the minimum allowable values of the increments (number of gradations) of state variables describing the dynamics of changing the values of the quality indicators of the electronic library, as well as the search for optimal time intervals for their discretization, are considered. An algorithm is proposed for determining the optimal number of gradations of state spaces for constructing a model of an electronic library. The algorithm takes into account the requirements for accuracy (deviation value) of the quality assessment criterion, for the stability of the main operational and technical indicators of the electronic library with respect to disturbing influences, as well as current user requirements for the mathematical complexity of assessing the quality of an object of this class. Analytical expressions are formulated to find the permissible error in estimating the value of the l -th quality indicator, sensitivity coefficient and the sampling time interval of the components of the vector quality indicator of the electronic library. The proposed approaches make it possible to formulate a reliable (adequate to control problems) mathematical model in the interests of assessing the quality of the electronic library, open up new possibilities for modeling the state of libraries and predict their quality, deepen our understanding of the mathematical nature of the process of changing states of complex controlled information technology systems and processes.

Key words: electronic library, state space, quality index, estimation, mathematical model, state transition process, Markov chain, equation of state, observation equation, minimum number of gradations, state variables, error, sampling time intervals, requirements for modeling accuracy, quality management

Введение. В свете тенденций развития современной науки и образования, внедрения федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования нового поколения, сегодня в российской научно-образовательной практике очень актуальна задача создания единого информационного пространства [13].

Одним из ключевых информационно-технологических элементов единого информационного пространства являются национальные библиотеки, причем ориентированные на цифровое будущее [8]. Эти объекты получили название электронных (цифровых) библиотек и активно развиваются во всем мире [15, 19, 22–24, 29]. Электронные библиотеки (ЭБ) имеют все крупнейшие страны мира, в частности большое развитие они получили в США и России [25, 26].

Современная ЭБ предназначена для хранения информации различных видов, прежде всего текстовой. Такие ЭБ реализуются в виде сложных распределенных информационных систем, обладающих унифицированным интерфейсом, а также возможностью доступа к ним пользователей через интернет [14, 17, 22, 23, 27, 28].

Электронные библиотеки как класс информационных систем характеризуются следующими особенностями:

- глобальным доступом к ним в среде Web;
- поддержкой метаданных для системы и пользователей;
- включением неоднородных информационных ресурсов: каталогов, электронных книг, справочников, аудиовизуальных, электронных документов и т.д.;
- распределением информационных ресурсов по назначению: государственные (национальные), корпоративные (предприятия, организации, ведомства), индивидуальные;
- наличием материализованных (в виде систем хранения данных, баз данных, дата-центров и дисков) и виртуальных коллекций информационных ресурсов (электронных версий печатных изданий, аудио и видеоданных и т.д.);
- интеграцией информационных ресурсов на различных уровнях;
- использованием пользовательских интерфейсов с возможностью их адаптации к контексту (семантике, смысловой сущности) поисковых запросов пользователей на получение конкретного информационного ресурса и др. [1].

В настоящее время ЭБ предоставляют качественно новые возможности работы с большими объемами информации. К таким возможностям можно отнести следующее:

- последовательный, выборочный или параллельный просмотр множества документов;
- многоаспектный поиск во всем объеме информации, хранящейся в ЭБ;
- копирование необходимых документов или их фрагментов как на бумагу, так и на другие носители;
- в ряде случаев (на определенных условиях) и в некоторых ЭБ – создание пользователями собственных документов, а также подборок документов и т.д. [5].

По сути ЭБ – это совокупность электронных ресурсов, организуемых по библиотечному принципу (т.е. на основе известных правил и технологий традиционного библиотековедения, включая комплектование, обработку, систематизацию, хранение и другие процессы и технологии, в том числе создание каталогов и справочно-поискового аппарата в электронной форме) [20].

При этом ЭБ является информационной системой, обеспечивающей сохранность и эффективное использование коллекции различных документов в электронной форме, размещенных в самой системе и доступных через телекоммуникационные сети в удобном для конечного пользователя виде. Иными словами, это упорядоченная коллекция разнородных электронных документов (в том числе книг журналов), снабженных средствами навигации и поиска [1, 20].

Исследуемая проблема заключается в том, что оптимальное управление ЭБ, управление ее качеством (качеством предоставляемого ею информационного ресурса) должно опираться на оценочные значения показателей качества объектов и процессов ЭБ на основе анализа результатов наблюдения за данной системой. Результаты наблюдения могут быть получены либо явно, путем измерения и диагностики реальных значений показателей ЭБ, либо, когда это невозможно или затруднено – путем моделирования динамики изменения показателей качества ЭБ в пространстве состояний. Способу нахождения важной характеристики для моделей такого типа – определению числа градаций пространства состояний посвящена данная статья.

Постановка задачи исследования. Важной задачей является оценивание качества ЭБ в интересах оптимального управления ее ресурсами [7]. При этом одним из ключевых этапов методологии оценивания качества процессов функционирования сложных информационно-технических систем, например, таких, как ЭБ, является моделирование динамики линейного или нелинейного изменения состояния (пошаговых значений) совокупности показателей качества (ПК) объектов и процессов ЭБ в пространстве состояний. Зачастую для построения моделей такого типа используют марковские или полумарковские последовательности с дискретным или непрерывным временем [2, 6, 16, 18]. Рассмотрим вариант аналитического описания процесса смены состояний ПК ЭБ.

В работах [2, 6] приведены примеры моделей на основе дискретных марковских цепей. Однако эти модели опираются на дискретные состояния ПК в дискретные моменты времени. Они относительно просты и позволяют моделировать состояния ПК сложных систем в динамике, но при этом оценки состояний будут получены точечные, пошаговые, что не всегда рационально с точки зрения принятия решений по управлению элементами и ресурсами ЭБ в целом. Зачастую достаточно интервальных оценок, усредненных за период наблюдения.

Поэтому нужна модифицированная модель, описывающая на основе марковских цепей с непрерывным временем (непрерывных цепей Маркова) динамику смены дискретных (конечных или счетных) состояний ПК ЭБ в непрерывном времени и с учетом преобразования шума возбуждения. Марковский случайный процесс называется цепью Маркова с непрерывным временем, если

переходы системы из состояния в состояние происходят не в фиксированные, а в случайные моменты времени [4].

Непрерывные марковские цепи описывают функционирование систем, принимающих в процессе работы конечное число состояний S_1, S_2, \dots, S_n . При этом переходы из одного состояния в другое осуществляются случайным образом в произвольные моменты времени t [3]. Иными словами, время пребывания системы в любом состоянии представляет непрерывную случайную величину. Как и в случае дискретной марковской цепи, необходимо выполнение марковского свойства, т.е. чтобы поведение системы в момент времени $t > t_0$ зависело только от состояния системы в момент времени t_0 и не зависело от поведения системы в моменты времени, предшествующие t_0 [30].

В результате модифицированная модель, на наш взгляд, должна представлять собой формализованное описание, в терминах непрерывной марковской цепи в форме разностных стохастических уравнений (НМЦ-РСУ), динамики изменений значений ПК ЭБ. Эти ПК, в свою очередь, характеризуют существенные свойства процесса функционирования ЭБ в пространстве состояний на непрерывном отрезке времени $t + \Delta t$.

Важным шагом при решении задач оценки качества ЭБ является формулировка совокупности ПК ЭБ – исходя из их необходимости и достаточности. При этом, поскольку эти ПК описывают разные характеристики ЭБ, они в идеале не должны быть коррелированы. Система ПК ЭБ, на наш взгляд, не должна быть громоздкой, избыточной, должна включать не более десяти локальных показателей и представлять собой иерархически взаимосвязанную совокупность этих ПК, характеризующих качество отдельных элементов ЭБ, процессов их функционирования и процесса обслуживания пользователей. Например, в качестве ПК, характеризующего своевременность предоставления услуг ЭБ, может выступать среднее время предоставления услуги пользователю. Под этим термином понимается свойство ЭБ, характеризующее ее способность обеспечивать доступ пользователей к запрашиваемым ресурсам ЭБ и предоставление им требуемого перечня услуг в установленные сроки или в реальном масштабе времени.

Достоверность предоставления услуг ЭБ – это свойство ЭБ, характеризующее ее способность обеспечивать с заданной точностью воспроизведение хранимой, обрабатываемой и передаваемой информации до пользователя. Показателем достоверности может выступать коэффициент достоверности информации, предоставляемой пользователю ЭБ: соотношение количества достоверно обработанных и предоставленных данных к общему количеству хранимых данных.

Безопасность предоставления услуг ЭБ – это свойство ЭБ, характеризующее способность ЭБ противостоять несанкционированному получению, уничтожению и (или) изменению хранимых в ней данных. Показателями, характеризующими безопасность ЭБ, могут выступать среднее время вскрытия нарушителем процессов, протекающих в ЭБ, либо вероятность компрометации предоставляемого контента.

Надежность ЭБ – ее способность сохранять в установленных пределах времени значения всех ключевых параметров, определяющих выполнение ею требуемых функций. К показателям надежности ЭБ можно отнести среднюю наработку на отказ ЭБ, среднее время восстановления ЭБ, коэффициент готовности ЭБ и коэффициент технического использования ЭБ.

Перечень этих показателей качества ЭБ приведен в качестве примера, он может быть дополнен показателями, характеризующими отказоустойчивость ЭБ, доступность контента ЭБ, объем хранения данных в ЭБ, ее масштабируемость и иными.

Как и в любой классической задаче теории оценивания, оценки могут быть представлены в двух видах: интервальные оценки и точечные оценки. Точечные оценки представляют собой оценочные значения ПК (число или числовой вектор) в конкретный момент (на конкретном временном срезе) времени, при этом моменты времени обозначаются t .

В данной статье рассматриваются интервальные оценки. Для них указывается доверительный интервал, в котором оцениваемая величина находится с определенной вероятностью, называемой коэффициентом доверия. Эти интервалы времени обозначаются через тире, например, интервал времени $t_0 - t_k$, либо как $t + \Delta t$.

Модифицированная модель смены состояний ПК ЭБ в терминах непрерывной марковской цепи может иметь вид:

$$\vec{\gamma}(t + \Delta t) = C^T(t + \Delta t) \vec{\Theta}(t + \Delta t); \quad (1)$$

$$\vec{\Theta}(t + \Delta t) = \Lambda^T(t + \Delta t, t, u) \vec{\Theta}(t) + \Delta \vec{\Theta}(t + \Delta t); \quad (2)$$

$$\vec{z}(t + \Delta t) = H(t, \vec{\gamma}(t)) \vec{\Theta}(t + \Delta t) + \vec{w}(t + \Delta t). \quad (3)$$

Выражение (1) – уравнение состояния ПК ЭБ на $(t + \Delta t)$ -м непрерывном временном интервале ее функционирования, в котором: $\vec{\gamma}(t + \Delta t)$ – вектор значений ПК ЭБ на $(t + \Delta t)$ -м временном интервале ее функционирования, в котором все элементы кроме одного (реального значения ПК ЭБ на данном интервале времени) равны 0;

$C^T(k + 1)$ – транспонированная диагональная квадратная матрица (порядка m) возможных значений ПК ЭБ на $(t + \Delta t)$ -м временном интервале ее функционирования, где число m (строк и столбцов) зависит от выбранного числа состояний (глубины моделирования);

$\bar{\Theta}(t + \Delta t)$ – вектор вспомогательных индикаторов состояния ПК ЭБ на $(t + \Delta t)$ -м временном интервале ее функционирования, который описывает динамику «тяготения» значений ПК ЭБ на $(t + \Delta t)$ -м временном интервале при переходе этих ПК из состояния в состояние.

Выражение (2) – уравнение состояния вспомогательных индикаторов состояния ПК ЭБ на $(t + \Delta t)$ -м временном интервале ее функционирования, в котором: $\Lambda^T(t + \Delta t, t, u)$ – транспонированная квадратная матрица (порядка m) плотностей вероятностей перехода λ_{ij} , представляющих собой предел отношения вероятности перехода системы за время $t + \Delta t$ из состояния i в состояние j к величине малого промежутка времени Δt (к длине этого промежутка) при стремлении Δt к нулю и обуславливающих смену состояний ПК ЭБ на $(t + \Delta t)$ -м временном интервале ее функционирования;

$\bar{\Theta}(t)$ – вектор значений индикаторов состояния ПК ЭБ на предыдущем (t) временном интервале ее функционирования; $\Delta\bar{\Theta}(t + \Delta t)$ – вектор приращений индикаторов состояния, элементы которого служат для компенсации нецелочисленной части выражения (2). Эти приращения (компенсационные добавки) могут быть получены исходя из «тяготения» значений ПК ЭБ на $(t + \Delta t)$ -м временном интервале при переходе этих ПК из состояния в состояние – в результате коррекции исходного шума возбуждения с математическим ожиданием и дисперсией, соответствующими начальному состоянию моделируемого процесса смены состояний конкретного ПК ЭБ.

Выражение (3) в системе уравнений (1)–(3), описывающих процесс смены состояний ПК ЭБ на $(t + \Delta t)$ -м непрерывном временном интервале ее функционирования, является уравнением наблюдения за процессом (процессом смены состояний ПК ЭБ), где $H(t, \vec{\gamma}(t))$ – квадратная диагональная матрица (порядка m) наблюдаемых значений процесса, а $\vec{w}(t + \Delta t)$ – вектор белых шумов наблюдения с нулевым средним и матрицей дисперсии $\delta_w(t + \Delta t)$.

При этом вычисление текущих значений индикаторов состояния ПК ЭБ на $(t + \Delta t)$ -м интервале времени в выражении (2) осуществляется на основе линейной процедуры:

$$\|\Delta\Theta(t + \Delta t)\| = \mathfrak{R} - \|\Theta^{\text{nai}}(t + \Delta t)\|; \quad (4)$$

$$\Delta\bar{\Theta}(t + \Delta t) = \|\Delta\Theta(t + \Delta t)\| \cdot \bar{\Theta}^{\text{prel}}(t + \Delta t); \quad (5)$$

$$\bar{\Theta}(t + \Delta t) = \bar{\Theta}^{\text{nai}}(t + \Delta t) + \Delta\bar{\Theta}(t + \Delta t). \quad (6)$$

Выражение (4) описывает правило получения элементов m -мерной матрицы приращений $\|\Delta\Theta(t + \Delta t)\|$ и содержит элементы: \mathfrak{R} – m -мерная диагональная единичная матрица; $\|\Theta^{\text{nai}}(t + \Delta t)\|$ – m -мерная матрица, столбцы которой – векторы нецелочисленных (not an integer) значений индикаторов $\bar{\Theta}^{\text{nai}}(t + \Delta t)$, повторенные m раз.

Выражение (5) описывает процедуру выбора вектора приращений $\Delta\bar{\Theta}(t + \Delta t)$ из матрицы приращений (компенсационных добавок) $\|\Delta\Theta(t + \Delta t)\|$ с помощью вектора $\bar{\Theta}^{\text{prel}}(t + \Delta t)$ предварительных значений (preliminary meaning) индикаторов моделируемого процесса смены состояний ПК ЭБ.

Выражение (6) завершает алгоритм вычислений вектора индикаторов состояний $\bar{\Theta}(t + \Delta t)$ и является модифицированной записью уравнения состояния моделируемого процесса смены состояний ПК ЭБ. При этом элементы вектора нецелочисленных значений индикаторов состояния находятся в соответствии с выражением

$$\bar{\Theta}^{\text{nai}}(t + \Delta t) = \Lambda^T(t + \Delta t, t, u) \bar{\Theta}(t). \quad (7)$$

Выражение (7) является модификацией известного уравнения – Колмогорова Чепмена [2] и получено в результате преобразования выражения (2).

Здесь $\bar{\Theta}^{\text{nai}}(t + \Delta t)$ – вектор нецелочисленных значений индикаторов состояния моделируемого процесса (процесса смены состояний ПК ЭБ), имеющий математический смысл интервальных и, в конечном итоге, финальных вероятностей нахождения случайного процесса в том или ином состоянии;

$\Lambda^T(t + \Delta t, t, u)$ – матрица (порядка m) плотностей λ_{ij} вероятностей перехода процесса из одного состояния в другое за время $t + \Delta t$;

$\bar{\Theta}(t)$ – вектор целочисленных значений индикаторов состояния моделируемого процесса на предыдущем временном интервале.

Уравнение (7) для отдельного k -го (из m возможных) нецелочисленного индикатора состояния $\Theta_k^{\text{nai}}(t + \Delta t)$ в общем случае имеет вид:

$$\Theta_k^{\text{nai}}(t + \Delta t) = \Theta_1(t)(\lambda_{k1} - \lambda_{km}) + \Theta_2(t)(\lambda_{k2} - \lambda_{km}) + \dots + \Theta_{m-1}(t)(\lambda_{km-1} - \lambda_{km}) + \lambda_{km}, \quad (8)$$

где $k = 1, 2, 3, \dots, m$, а $\lambda_{k1}, \dots, \lambda_{km}$ – элементы матрицы $\Lambda^T(t + \Delta t, t, u)$ плотностей вероятностей перехода процесса из одного состояния в другое за время $t + \Delta t$.

Таким образом, выражениями (1)–(8) представлен вариант математической модели (в терминах непрерывной марковской цепи в форме разностных стохастических уравнений), описывающей динамику изменения состояний ПК ЭБ $\bar{\gamma}(t + \Delta t)$ на $(t + \Delta t)$ -м временном интервале ее функционирования.

Важной ключевой задачей при формулировке модели ЭБ в интересах оценки качества ее функционирования является определение числа m , т.е. обоснованный выбор количества состояний ПК, характеризующих свойства ЭБ и определяющих «глубину моделирования». Под этим термином будем понимать уровень детализации анализа и описания свойств ЭБ, степень, «глубину» декомпозиции описания (моделирования) свойств объекта с помощью определенного количества параметров (показателей) их численно характеризующих. Чем больше количество ПК и состояний ПК, характеризующих (описывающих) свойства ЭБ, тем «глубже» это описание.

Алгоритм синтеза числа градаций пространства состояний. Количество состояний определяется исходя из требуемой «глубины моделирования» и точности оценивания ПК ЭБ. Оптимизация размерности пространств состояния и наблюдения процесса функционирования ЭБ с учетом требований к допустимой погрешности оценивания, представляет собой отдельную теоретическую и практическую задачу.

Действительно, одной из ключевых задач, требующих решения в рамках разработки процедур оценивания качества ЭБ, является задача отыскания адекватных условиям функционирования и применения ЭБ, достаточного, с точки зрения изменяющихся во времени задач управления ЭБ, числа градаций переменных состояния процесса функционирования ЭБ и временных интервалов их дискретизации. Решение этой задачи направлено на снижение затрат на реализацию процесса функционирования ЭБ, повышение оперативности, достоверности (точности) оценивания качества процесса функционирования ЭБ и обуславливает ценность информации, добываемой в рамках анализа, адекватную возможностям и задачам управления ЭБ в условиях конкретной ситуации.

Очевидно, что формирование достаточных градаций переменных состояния (т.е. ПК) базируется на результатах формирования векторных критериев оценивания состояния и качества процесса функционирования ЭБ – ПК ЭБ. Иными словами, ставится задача адекватного согласования числа градаций уровней (состояний) оцениваемых параметров и ПК ЭБ с текущими требованиями к основным оперативно-техническим показателям ЭБ в условиях конкретной ситуации.

При отыскании достаточного числа градаций переменных состояния и временных интервалов их дискретизации необходимо учитывать следующее:

- требования к «глубине моделирования» и точности (величине отклонения) значения критерия оценивания состояния и качества процесса функционирования ЭБ;
- требования к устойчивости основных оперативно-технических показателей ЭБ относительно возмущающих воздействий;
- требования к форме представления пространств состояния со стороны пользователей, проводящих оценивание качества ЭБ;

- требования к снижению математической сложности моделирования и оценивания качества электронной библиотеки.

Одна из традиционных методик оптимизации представления пространств состояния и наблюдения критериев оптимальности в задачах синтеза сложных управляемых систем, приведена в работе [2]. Опираясь на эту методику, учитывая перечисленные факторы, особенности формулировки систем параметров и ПК ЭБ и критериев их оценивания, сформируем вариант алгоритма отыскания оптимального и адекватного текущим задачам управления ЭБ числа градаций пространств состояния для ПК библиотеки, по которым оценивается ее качество.

Блок-схема алгоритма, описывающего последовательность решения задачи определения числа градаций переменных состояния и временных интервалов их дискретизации, приведена на рисунке.

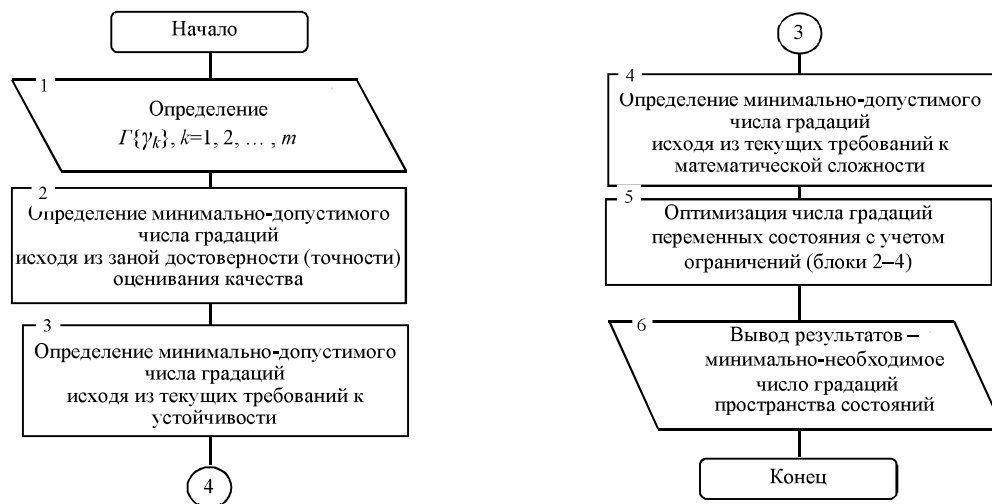


Рисунок – Блок-схема алгоритма поиска числа градаций переменных состояния и временных интервалов их дискретизации

Данный алгоритм (рис.) включает в себя следующие этапы:

1. **Определение минимально-необходимой размерности пространств состояния** $\Gamma = \{\gamma_k\}, k = 1, m$ процесса функционирования ЭБ.
2. **Определение минимально-допустимых значений приращений (числа градаций) переменных состояния и временных интервалов их дискретизации** исходя из заданной достоверности (точности) оценивания качества процесса функционирования ЭБ в конкретных условиях, определяемых в рамках текущих требований к точности управления электронной библиотекой. При этом целями управления является своевременное (в установленные сроки или в реальном масштабе времени) и безопасное обеспечение пользователей ЭБ достоверными данными (контентом, предоставляемым электронной библиотекой).
3. **Определение минимально-допустимых значений приращений (числа градаций) переменных состояния и временных интервалов их дискретизации** исходя из текущих требований к устойчивости процесса функционирования ЭБ и процесса управления ЭБ к возмущающим воздействиям. Под устойчивостью понимается свойство процесса возвращаться в заданный или близкий к нему установившийся режим после какого-либо внешнего или внутреннего возмущения.
4. **Определение минимально-допустимых значений приращений (числа градаций) переменных состояния (ПК) и временных интервалов их дискретизации** с учетом текущих требований пользователя к математической сложности оценивания качества процесса функционирования ЭБ, определяемых в рамках требований к временным и вычислительным затратам на реализацию процедуры моделирования и оценивания качества ЭБ.
5. **Оптимизация значений приращений (числа градаций) переменных состояния и временных интервалов их дискретизации** с учетом ограничений, введенных на 2–4 шагах алгоритма.

Для оптимизации числа градаций переменных состояния (т.е. ПК) процесса функционирования ЭБ и временных интервалов их дискретизации представляется целесообразным использовать методы теории чувствительности. Методами, позволяющими найти функцию чувствительности в задачах подобного класса, могут служить: метод построения уравнений чувствительности, прямой и регрессионный методы, метод параметрической идентификации, структурный метод, метод

графов, метод конечных разностей, метод приращений, а также применение квадратичных показателей дополнительного движения [9, 21].

Трудность решения этой задачи определяется прежде всего сложностью пересчета ограничений на оперативно-технические ПК ЭБ и действующих на нее возмущений в требования к точности моделирования и оценивания состояния (качества) по отдельным компонентам векторного критерия оценивания. Принято считать, что критериальное оценивание это оценивание по критериям, т.е. оценка складывается из составляющих (критериев), которые отражают различные стороны (характеристики, свойства, ПК) объектов и процессов. Критерий оценки качества ЭБ может быть скалярным, т.е. характеризоваться одним единственным ПК, или векторным, характеризующимся совокупностью ПК. Это получение интегральной оценки качества при наличии различных частных, несводимых друг к другу критериев оценивания. Методы получения обобщенного показателя качества и методы многокритериального оценивания состояния, качества и эффективности функционирования сложных информационно-технических систем рассмотрены в работах [2, 6, 9, 10–12].

Процесс функционирования ЭБ, а значит, и оценивание качества ЭБ, является составной частью процесса функционирования информационного пространства. Значит, несет в себе те же требования к степени точности поддержания значений ПК ЭБ, а следовательно, и к точности моделирования и оценивания.

Иными словами, точность моделирования и оценивания ПК ЭБ задает пользователь. В этом случае, если известна допустимая погрешность моделирования (и оценивания) значения l -го ПК ЭБ, входящего в L -ый вектор состояния (в L -ый частный показатель качества), которую можно обозначить $\Delta I_{l \text{ allow}}(\vec{\gamma}(t + \Delta t); \tau(t + \Delta t))$, соответствующая градация значений ПК $\Delta \gamma_l$ может быть определена на основе коэффициентов чувствительности из выражения

$$\Delta I_{l \text{ allow}}(\vec{\gamma}(t + \Delta t); \tau(t + \Delta t)) \geq \sum_{l=1}^n v_l(t + \Delta t) \Delta \gamma_l(t + \Delta t) + v_\tau(t + \Delta t) \Delta \tau_{\text{discr}}(t + \Delta t), \quad (9)$$

где $\Delta I_{l \text{ allow}}(\vec{\gamma}(t + \Delta t); \tau(t + \Delta t))$ – допустимое приращение (allowable increment) l -й компоненты L -го вектора состояния (векторного ПК ЭБ) на $(t + \Delta t)$ -ом интервале моделирования и оценивания качества ЭБ.

При этом коэффициент чувствительности l -й компоненты по L -й переменной (вектору) состояния (по $\Delta \gamma$ – состояниям и по $\Delta \tau$ – времени) равен

$$v_l(t + \Delta t) = \frac{\partial I_l(\vec{\gamma}(t + \Delta t); \tau(t + \Delta t))}{\partial \gamma_L}. \quad (10)$$

В качестве примера, матрица $v_L(t + \Delta t)$ коэффициентов чувствительности в явном виде для трех уровней чувствительности трех компонент L -го вектора состояния (векторного ПК ЭБ) может быть описана, как показано в выражении (11).

$$v_L(t + \Delta t) = \begin{vmatrix} 0,1 & 0,1 & 0,2 \\ 0,1 & 0,2 & 0,3 \\ 0,2 & 0,3 & 0,3 \end{vmatrix}. \quad (11)$$

Временные интервалы дискретизации (discretization) $\Delta \tau_{l \text{ discr}}(t + \Delta t)$ учтены в коэффициентах чувствительности и определяются, исходя из скорости изменения (флюктуаций) ПК ЭБ – $\alpha(t + \Delta t)$ [9]:

$$\alpha(t + \Delta t) = \frac{1}{\tau_{\text{correl}}(t + \Delta t)} = \Delta \tau_{l \text{ discr}}(t + \Delta t) \leq \frac{1}{2\alpha(t + \Delta t)} \leq \frac{1}{2} \tau_{\text{correl}}(t + \Delta t), \quad (12)$$

где $\tau_{\text{correl}}(t + \Delta t)$ – интервал корреляции (correlations) компонент векторного ПК электронной библиотеки на $(t + \Delta t)$ -м временном интервале.

Таким образом, из всех полученных в результате решения уравнений (9) и (10) и с учетом ограничения (12), допустимых временных интервалов $\Delta \tau_{l \text{ discr}}(t + \Delta t)$, необходимо выбрать минимальный с целью обеспечения заданной погрешности моделирования и оценивания по состоянию самого быстроменяющегося показателя качества процесса функционирования ЭБ.

Полученные результаты могут быть использованы в интересах оптимального управления ЭБ, управления ее качеством и качеством предоставляемого ею информационного ресурса. Найденные значения числа градаций переменных состояния и временных интервалов их дискретизации опре-

деляют требуемые границы чувствительности и устойчивости оценок, тем самым, позволяя получать достоверные оценочные значения показателей качества ЭБ на основе моделирования динамики изменения этих ПК в пространстве состояний.

Заключение. Итак, предложенный алгоритм позволяет определить минимально-необходимое число градаций пространства состояний показателей качества электронной библиотеки. Он дополняет существующие подходы к моделированию сложных управляемых систем с учетом их представления в виде смены значений существенных параметров (показателей) объектов такого класса в пространстве состояний. Это позволяет сформулировать достоверную (адекватную задачам управления) математическую модель в интересах оценки качества электронной библиотеки, открывает новые возможности для моделирования состояний ЭБ и прогнозирования их качества, углубляет наши представления о математической природе процесса смены состояний сложных управляемых информационно-технических систем и процессов. Вместе с тем, при формировании минимально-необходимого числа градаций пространства состояний ПК для процесса функционирования ЭБ необходимо согласовывать полученные разбиения с формой представления вектора параметров (векторного ПК) ЭБ – дискретного по состояниям, но непрерывного по времени для всех входящих в него переменных, характеризующих качество электронной библиотеки.

Библиографический список

1. Богданова И. Ф. Электронные библиотеки: история и современность / И. Ф. Богданова, Н. Ф. Богданова // Информационное общество: образование, наука, культура и технологии будущего. – 2017. – Вып. 1. – С. 133–154.
2. Буренин Н. И. Методологические аспекты применения методов многокритериальной динамической оптимизации в задачах синтеза управляемых сетей многоканальной радиосвязи / Н. И. Буренин, А. П. Родинов, В. М. Терентьев. – Ленинград : ВАС, 1984. – 92 с.
3. Зейфман А. И. Марковские цепи и модели с непрерывным временем / А. И. Зейфман, В. Е. Бенинг, И. А. Соколов. – Москва : ЭЛЕКС-КМ, 2008. – 167 с.
4. Зорин А. В. Введение в общие цепи Маркова / А. В. Зорин, В. А. Зорин, Е. В. Пройдакова, М. А. Федоткин. – Нижний Новгород : Нижегородский госуниверситет, 2013. – 51 с.
5. Зуйкина К. Л. Электронные библиотеки в России. Текущий статус и перспективы развития / К. Л. Зуйкина, Д. В. Соколова, А. В. Скалабан. – Москва : Ваш формат, 2017. – 120 с.
6. Калинин В. Н. Теоретические основы системных исследований / В. Н. Калинин. – Санкт-Петербург : ВКА им. А.Ф. Можайского, 2013. – 278 с.
7. Крюкова Е. С. Особенности развития современных электронных библиотек и анализ подходов к оцениванию их качества / Е. С. Крюкова, И. Б. Парашук // Современные технологии: актуальные вопросы, достижения и инновации : сборник статей XXXI Международной научно-практической конференции. – Пенза : МЦНС «Наука и Просвещение», 2019. – С. 34–36.
8. Матвеев М. Ю. Национальные библиотеки: на пути к цифровому будущему / М. Ю. Матвеев // Вестник СПбГУКИ. – 2017. – № 2 (31). – С. 88–95.
9. Ненадович Д. М. Анализ чувствительности процессов фильтрации состояний управляемой радиотехнической системы / Д. М. Ненадович, И. Б. Парашук // Радиотехника. – 1997. – № 4. – С. 23–25.
10. Петухов Г. Б. Основы теории эффективности целенаправленных процессов / Г. Б. Петухов. – Москва : МО СССР, 1989. – 660 с.
11. Статистические модели и многокритериальность задачи принятия решений / под ред. И. Ф. Шахнова. – Москва : Статистика, 1984. – 563 с.
12. Терентьев В. М. Теоретические основы управления сетями многоканальной радиосвязи / В. М. Терентьев, И. Б. Парашук. – Санкт-Петербург : ВАС, 1995. – 195 с.
13. Шаповалова Г. М. Информационное общество: от цифровых архивов к цифровому культурному наследию / Г. М. Шаповалова // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – № 5–6. – С. 177–181.
14. Beel J. Research-paper recommender systems: a literature survey / J. Beel, B. Gipp, S. Lange, C. Breitinger // International Journal on Digital Libraries. – 2015. – № 17 (4). – P. 305–338.
15. Besser H. The Past, Present, and Future of Digital Libraries / H. Besser // A Companion to Digital Humanities. – Blackwell Publishing Ltd, 2004. – P. 557–575.
16. Bini D. Numerical Methods for Structured Markov Chains / D. Bini, G. Latouche, B. Meini. – Oxford University Press ; New York, 2005. – 215 p.
17. Candela L. History, Evolution and Impact of Digital Libraries / L. Candela, D. Castelli, Pagano. – E-Publishing and Digital Libraries : Legal and Organizational Issues, IGI Global, 2011. – P. 1–30.
18. Ethier S. N., Kurtz T. G. Markov processes. Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics: Probability and Mathematical Statistics / S. N. Ethier, T. G. Kurtz. – New York : John Wiley & Sons Inc., 1986. – P. 214–234.
19. Isah A. Digital Libraries: Analysis of Delos Reference Model and 5S Theory / A. Isah, B. C. Serema, A. Mutshewa, L. Kenosi // Journal of Information Science Theory and Practice. – 2013. – № 1 (4). – P. 38–47.
20. Kokoykina O. N. The development of the information society and issues of digital preservation. Formation of regional cultural policy in the context of the modernization of education / O. N. Kokoykina // International scientific-practical conf. – Orel, 2014. – P. 53–56.

21. Kotenko I. V. Analysis of the Sensitivity of Algorithms for Assessing the Harmful Information Indicators in the Interests of Cyber-Physical Security / I. V. Kotenko, I. B. Parashchuk // *Cyber-Physical Systems*. – 2019. – № 8 (3). – P. 1–15.
22. Lanagan J. Video digital libraries: contributive and decentralized / J. Lanagan, A. F. Smeaton // *International Journal on Digital Libraries*. – 2012. – № 12 (4). – P. 159–178.
23. Papy F. *Digital Libraries* / F. Papy. – 1st ed. – Amsterdam, Netherlands, 2016. – 152 p.
24. Pomerantz J. The digital library as place / J. Pomerantz, G. Marchionini // *Journal of Documentation*. – 2007. – № 63 (4). – P. 505–533.
25. Reilly B. F. Jr. Rethinking the National Library / B. F. Reilly // *American Libraries*. – 2016. – Vol. 47, iss. 11–12. – 30 p.
26. Russian Association of Digital Libraries 2020. – Режим доступа: <http://www.aselib.ru/index.html>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 17.01.2020).
27. Trivedi M. Digital Libraries: Functionality, Usability, and Accessibility. *Library Philosophy and Practice (e-journal)* / M. Trivedi. – 2010. – P. 381. – Режим доступа: <http://digitalcommons.unl.edu/libphilprac/381>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 17.01.2020).
28. Van Le C. Opening the Doors to Digital Libraries: A Proposal to Exempt Digital Libraries From the Copyright Act / Van Le C. // *Case Western Reserve Journal of Law, Technology & The Internet*. – 2010. – № 1-2. – P. 135.
29. Witten I. H. *How to Build a Digital Library* / I. H. Witten, D. Bainbridge, D. M. Nichols. – 2nd ed. – Walham, US, 2009. – 656 p.
30. Yin G. G. *Continuous-Time Markov Chains and Applications: A Singular Perturbation Approach* / G. G. Yin, Q. Zhang. – Springer, 2012. – 351 p.

References

1. Bogdanova I. F., Bogdanova N. F. *Elektronnye biblioteki: istoriya i sovremennost* [Digital Libraries: History and Present]. *Informatsionnoe obshchestvo: obrazovanie, nauka, kultura i tekhnologii budushchego* [Information society: education, science, culture and future technologies], 2017, issue 1, pp. 133–154.
2. Burenin N. I., Rodimov A. P., Terentev V. M. *Metodologicheskie aspekty primeneniya metodov mnogokriterialnoy dinamicheskoy optimizatsii v zadachakh sinteza upravlyaemykh setey mnogokanalnoy radiosvyazi* [Methodological aspects of the application of multicriteria dynamic optimization methods in the synthesis of controlled multichannel radio communication networks]. Leningrad, VAS Publ., 1984. 92 p.
3. Zeyfman A. I., Bening V. E., Sokolov I. A. *Markovskie tsepi i modeli s nepreryvnym vremenem* [Markov chains and continuous time models]. Moscow, ELEKS-KM Publ., 2008. 167 p.
4. Zorin A. V., Zorin V. A., Proydakova E. V., Fedotkin M. A. *Vvedenie v obshhie cepi Markova* [Introduction to general Markov chains]. Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod State University, 2013. 51 p.
5. Zuykina K. L., Sokolova D. V., Skalaban A. V. *Elektronnye biblioteki v Rossii. Tekushchiy status i perspektivy razvitiya* [Digital Libraries in Russia. Current status and development prospects]. Moscow, Vash format Publ., 2017. 120 p.
6. Kalinin V. N. *Teoreticheskie osnovy sistemnykh issledovaniy* [Theoretical foundations of system research]. Saint Petersburg, 2013. 278 p.
7. Kryukova E. S., Parashchuk I. B. *Osobennosti razvitiya sovremennykh elektronnykh bibliotek i analiz podkhodov k otsenivaniyu ikh kachestva* [Features of the development of modern electronic libraries and analysis of approaches to assessing their quality]. *Sovremennye tekhnologii: aktualnye voprosy, dostizheniya i innovatsii: sbornik statey XXXI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Modern technologies: current issues, achievements and innovations: collection of articles of the XXXI International scientific and practical conference]. Penza, Nauka i Prosveshchenie, 2019, pp. 34–36.
8. Matveev M. Yu. *Natsionalnye biblioteki: na puti k tsifrovomu budushchemu* [National Libraries: Towards a Digital Future]. *Vestnik Sankt-Peterburskogo gosudarstvennogo instituta kulture* [Bulletin of Saint Petersburg Institute of Culture], 2017, no. 2 (31), pp. 88–95.
9. Nenadovich D. M., Parashchuk I. B. *Analiz chuvstvitelnosti protsessov filtratsii sostoyaniy upravlyaemoy radiotekhnicheskoy sistemy* [Sensitivity analysis of state filtration processes of a controlled radio engineering system]. *Radiotekhnika* [Radiotechnics], 1997, no. 4, pp. 23–25.
10. Petukhov G. B. *Osnovy teorii e ffektivnosti tselenapravlennykh protsessov* [Fundamentals of the theory of the effectiveness of targeted processes]. Moscow, Ministry of Defense of the USSR, 1989. 660 p.
11. Shakhnov I. F. (ed.) *Statisticheskie modeli i mnogokriterialnost zadachi prinyatiya resheniy* [Statistical models and multicriteria decision-making problems]. Moscow, Statistika, 1984. 563 p.
12. Terentev V. M., Parashchuk I. B. *Teoreticheskie osnovy upravleniya setyami mnogokanalnoy radiosvyazi* [Theoretical foundations of multichannel radio network management]. Saint Petersburg, VAS Publ., 1995. 195 p.
13. Shapovalova G. M. *Informatsionnoe obshchestvo: ot tsifrovyykh arkhivov k tsifrovomu kulturnomu naslediyu* [The Information Society: From Digital Archives to Digital Cultural Heritage]. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International Research Journal], 2016, no. 5–6, pp. 177–181.
14. Beel J., Gipp B., Lange S., Breitinger C. Research-paper recommender systems: a literature survey. *International Journal on Digital Libraries*, 2015, no. 17 (4), pp. 305–338.
15. Besser H. *The Past, Present, and Future of Digital Libraries. A Companion to Digital Humanities*. Blackwell Publishing Ltd, 2004, pp. 557–575.

16. Bini D., Latouche G., Meini B. *Numerical Methods for Structured Markov Chains*. Oxford University Press; New York, 2005. 215 p.
17. Candela L., Castelli D., Pagano. *History, Evolution and Impact of Digital Libraries. E-Publishing and Digital Libraries: Legal and Organizational Issues*. IGI Global, 2011, pp. 1–30.
18. Ethier S. N., Kurtz T. G. *Markov processes. Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics: Probability and Mathematical Statistics*. New York, John Wiley & Sons Inc., 1986, pp. 214–234.
19. Isah A., Serema B. C., Mutshewa A., Kenosi L. Digital Libraries: Analysis of Delos Reference Model and 5S Theory. *Journal of Information Science Theory and Practice*, 2013, no. 1 (4), pp. 38–47.
20. Kokoykina O. N. The development of the information society and issues of digital preservation. Formation of regional cultural policy in the context of the modernization of education. *International scientific-practical conf.*, Orel, 2014, pp. 53–56.
21. Kotenko I. V., Parashchuk I. B. Analysis of the Sensitivity of Algorithms for Assessing the Harmful Information Indicators in the Interests of Cyber-Physical Security. *Cyber-Physical Systems*, 2019, no. 8 (3), pp. 1–15.
22. Lanagan J., Smeaton A. F. Video digital libraries: contributive and decentralized. *International Journal on Digital Libraries*, 2012, no. 12 (4), pp. 159–178.
23. Papy F. *Digital Libraries*. 1st ed. Amsterdam, Netherlands, 2016. 152 p.
24. Pomerantz J., Marchionini G. The digital library as place. *Journal of Documentation*, 2007, no. 63 (4), pp. 505–533.
25. Reilly B. F. Jr. Rethinking the National Library. *American Libraries*, 2016, vol. 47, iss. 11–12. 30 p.
26. *Russian Association of Digital Libraries 2020*. Available at: <http://www.aselib.ru/index.html> (accessed 17.01.2020).
27. Trivedi M. Digital Libraries: Functionality, Usability, and Accessibility. *Library Philosophy and Practice (e-journal)*, 2010, p. 381. Available at: <http://digitalcommons.unl.edu/libphilprac/381> (accessed 17.01.2020).
28. Van Le C. Opening the Doors to Digital Libraries: A Proposal to Exempt Digital Libraries From the Copyright Act. *Case Western Reserve Journal of Law, Technology & The Internet*, 2010, no. 1–2, p. 135.
29. Witten I. H., Bainbridge D., Nichols D. M. *How to Build a Digital Library*. 2nd ed. Waltham, US, 2009. 656 p.
30. Yin G. G., Zhang Q. *Continuous-Time Markov Chains and Applications: A Singular Perturbation Approach*. Springer, 2012. 351 p.

DOI 10.21672/2074-1707.2020.49.4.131-143

УДК 519.6, 004.021

ПРИМЕНЕНИЕ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ТОЛЩИНЫ ПОКРЫТИЯ

Статья получена редакцией 20.02.2020, в окончательном варианте – 04.03.2020.

Соловьев Денис Сергеевич, Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина, 392036, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Интернациональная, 33, кандидат технических наук, e-mail: solovjevdenis@mail.ru

Соловьева Инна Александровна, Тамбовский государственный технический университет, 392000, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Советская, 106, аспирант, e-mail: good.win32@yandex.ru

Литовка Юрий Владимирович, Тамбовский государственный технический университет, Российская Федерация, 392000, г. Тамбов, ул. Советская, 106, доктор технических наук, профессор, e-mail: polychem@list.ru

В работе рассматривается применение углеродных нанотрубок для улучшения равномерности гальванических покрытий. Сформулирована задача поиска концентрации углеродных нанотрубок в электролите для улучшения равномерности толщины покрытия. Разработана математическая модель гальванического процесса, которая учитывает концентрацию углеродных нанотрубок в электролите. Для решения прямой задачи оптимизации (поиска оптимальной концентрации углеродных нанотрубок в электролите) поставлена обратная задача поиска функции катодной поляризации при добавлении в электролит углеродных нанотрубок. Увеличение скорости решения обратной задачи может быть достигнуто с применением технологии распараллеливания вычислений. Составлен алгоритм решения для прямой и обратной задач оптимизации. Для хранения требуемой информации разработаны базы данных. Проведена серия компьютерных и экспериментальных исследований по гальваническому нанесению цинкового покрытия с добавлением углеродных нанотрубок в электролит. Доказано, что присутствие углеродных нанотрубок в растворе электролита способно положительно влиять на равномерность получаемого покрытия.

Ключевые слова: прямая задача оптимизации, обратная задача оптимизации, математическое моделирование, эксперимент, углеродные нанотрубки, алгоритм, база данных, неравномерность покрытия