УДК 658.3

М. И. Кулак, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой (БГТУ);
Н. Э. Трусевич, кандидат экономических наук, доцент (БГТУ);
Т. А. Сакулевич, студентка (БГТУ); **И. В. Харитончик**, студентка (БГТУ)

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ПЕЧАТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА СТАДИЯХ ЕГО ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

Статья посвящена методике статистического моделирования надежности печатного оборудования. Предложен вариант отраслевой классификации отказов при выполнении технологических операций. Проведено статистическое исследование интенсивности отказов для печатного цеха реального полиграфического предприятия. Построена обобщенная аналитическая функция интенсивности отказов, которая описывает надежность оборудования на протяжении всего жизненного цикла его эксплуатации. Приведены результаты расчетов изменения интенсивности отказов на протяжении жизненного цикла для реальных печатных машин.

Article is dedicated to methods of statistical modeling to reliability of the print equipment. The offered variant to branch categorization refusal when performing technological operation. It is organized statistical study to intensities refusal for printed shop of the real printed enterprise. It is built generalised analytical function to intensities refusal, which describes reliability of the equipment on length of the whole life cycle to his usages. The broughted results calculation change to intensities refusal on length of the life cycle for real printed machines.

Введение. Необходимость в исследовании отказов диктуется тем объективным обстоятельством, что технологическое оборудование и выполняемые на нем операции не имеют абсолютной надежности. Отказы оборудования могут приводить к необходимости повторного выполнения технологических операций, а это, в свою очередь, увеличивает расход материалов и затраты на изготовление продукции, снижает экономическую эффективность производства. Поэтому исследование надежности полиграфического оборудования является актуальной задачей. Результаты таких исследований могут быть использованы при решении многих задач оперативного и стратегического управления [1].

Целью данной работы является исследование динамики и причин возникновения отказов при выполнении технологических операций, а также построение аналитической функции надежности, охватывающей все стадии жизненного цикла оборудования.

Экспериментальная часть. Для решения задачи оценки характеристик надежности в первую очередь может быть использована информация, получаемая на этапе реальной эксплуатации оборудования. Негативной стороной эксплуатационных наблюдений является малый объем статистических данных.

Ввиду указанных особенностей, возникающих при анализе эксплуатационной информации, при проведении исследователями встает проблема достоверного оценивания характеристик надежности. Наиболее полно специфику функционирования оборудования отражает эксплуатационная информация.

Основными источниками статистических данных о дефектах и отказах оборудования являются:

1) журналы дефектов, которые ведутся в соответствии с правилами технической эксплуатации оборудования;
2) акты расследования нарушений в работе оборудования, составляемые по результатам расследований причин сбоев в его работе;
3) паспортные данные оборудования;
4) сведения о плановых ремонтах;
5) статистические данные о наработках оборудования;
6) сведения о выводе оборудования из эксплуатации;
7) отчеты и справки о состоянии оборудования, базы данных исследовательских организаций.

В ходе данного исследования были проанализированы статистические данные об отказах оборудования печатного цеха одного из ведущих полиграфических предприятий за 2004–2011 гг., зафиксированные в журналах учета технического состояния, техобслуживания и ремонтов оборудования, а также в техническом журнале контроля качества печатных форм. Предприятие сертифицировано по системе международных стандартов качества СМК ИСО 9000, поэтому журналы ведутся в соответствии с требованиями этой системы.

Зафиксированные в журналах данные на первом этапе обработки были введены в электронные таблицы Excel. Далее они были отсортированы по годам наблюдения и номерам печатных машин. Всего в цеху установлено 13 листовых двух- и четырехкрасочных печатных машин, продолжительность эксплуатации которых составляет 13–27 лет.

Для систематизации причин отказов разработана предварительная их классификация. Все отказы разбиты на 5 групп, включающих: отказы оборудования; нарушение технологии; несоответствие

материалов; ошибки персонала; условия в цехах. В соответствии с этой классификацией определялось общее количество отказов за год, а также их количество для каждой печатной машины.

На рис. 1 приведена динамика возникновения отказов при выполнении технологических операций на печатной стадии. Несмотря на то, что отказы фиксируются в печатном цеху, часть из них происходит по причине различных нарушений на допечатной стадии. Поэтому на рис. 1 приведены общие данные, которые этот факт учитывают.

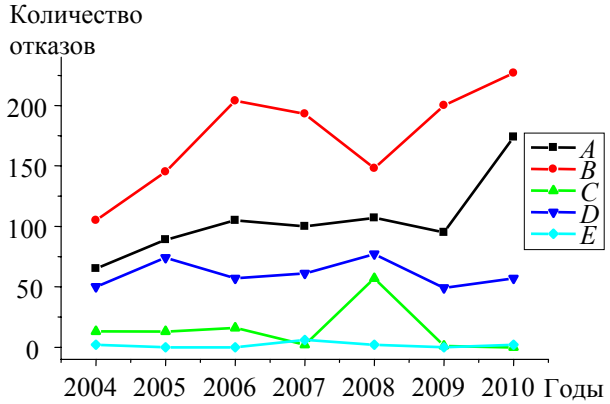

Рис. 1. Динамика возникновения отказов при выполнении технологических операций на печатной стадии по причине: *A* — отказы оборудования; *B* — нарушение технологии; *C* — несоответствие материалов; *D* — ошибки персонала; *E* — условия в цехах

Анализ данных на рис. 1 показывает, что наибольшее количество отказов происходит по причине нарушения технологии. Причем налицо тенденция их роста. Отказы оборудования занимают второе место, и поскольку оборудование отработало нормативный срок эксплуатации, составляющий для листовых печатных машин 11 лет, имеет место рост их количества. Отказы по вине персонала в целом остаются стабильными и находятся на третьем месте. Доля отказов по причине несоответствия материалов и климатических условий в цехах нормативным требованиям незначительна.

Резкое увеличение в 2008 г. количества отказов по причине несоответствия материалов практически точно эквивалентно их уменьшению в этот год в группе, относящейся к нарушению технологии. Данное обстоятельство подчеркивает необходимость разработки четкой отраслевой классификации причин отказов, которая в настоящее время отсутствует.

Классификация отказов в полиграфической технологии. К настоящему времени предпринято несколько попыток разработки классификации отказов в полиграфической технологии [2, 3].

В работе [2] по результатам исследования дефектов печатной продукции сделан вывод, что их причины можно разделить на 6 групп, которые располагаются в порядке уменьшения значимости следующим образом (в скобках указана доля дефектов по результатам экспертного опроса специалистов):

1) нарушения в работе оборудования (23%);

2) несоблюдение технологии (20%);

3) несоответствие материалов нормативным требованиям (19%);

4) недостаточная квалификация персонала (14%);

5) погрешности и недостаточная точность способов измерения показателей качества печатной продукции (13%);

6) несоответствие климатических условий в цеху нормативным требованиям (11%).

В диссертационной работе [3] предложено классифицировать отказы, возникающие на печатной стадии технологического процесса, по происхождению в одну из 5 групп:

1) технологические отказы, возникающие при недостаточной отлаженности технологического процесса, а также при разрегулировании системы управления этим процессом;

2) эксплуатационные отказы, возникающие по причине неправильных действий или невнимательности обслуживающего персонала;

3) отказы программного обеспечения управляющих ЭВМ;

4) отказы электроники и электромеханического оборудования;

5) отказы механических узлов.

Как видим, в обеих классификациях присутствуют отказы оборудования в качестве причины возникновения дефектов печатной продукции. Однако в классификации, предложенной в работе [3], эти отказы разбиты на более мелкие группы — с 3 до 5. В целом, обе классификации дополняют друг друга, но ни одна из них не является исчерпывающей.

Методической основой для разработки отраслевой классификации отказов в полиграфической технологии может служить Руководящий нормативный документ (РНД) [4]. В нем указано, что целью классификации отказов является обеспечение решения задач надежности, таких как нормирование, анализ, оценка, прогнозирование, требующих применения результатов классификации отказов.

Основным объектом рассмотрения в РНД является отказавшее изделие. Его аналогом для целей настоящего исследования можно считать любой вид печатной продукции. Системная последовательность при разработке классификации состоит в структурировании информации об отказах.

В данной работе предлагается всю информацию об отказах разбить на 3 структурных уровня:

1) вид данных об отказавшем изделии; 2) классификационная группа; 3) компоненты данных.

В классификации рассматриваются следующие виды данных: 1) общие данные; 2) характеристика изделия; 3) стадия жизненного цикла; 4) стадия изготовления; 5) условия пользования; 6) режим пользования; 7) характеристика отказа; 8) данные о восстановлении изделия; 9) данные о наработке изделия до отказа.

Наибольший интерес для данного исследования представляет вид данных «характеристика отказа», который включает следующие классификационные группы: 1) внешнее проявление; 2) способ установления; 3) механизм отказа; 4) причина возникновения; 5) наименование отказа; 6) последствия отказа.

Ограниченный объем статьи не позволяет раскрывать компоненты данных для каждой классификационной группы, укажем, что всего для вида данных «характеристика отказов» в классификации используется 38 компонентов данных.

Статистическое исследование отказов. Для описания поведения систем и их элементов с точки зрения надежности используются параметрические семейства различных функций распределения наработки, аналитическое описание которых приведено, например, в источнике [5]. При соответствующем выборе параметров модели безотказности на основе описанных распределений функция интенсивности отказов может быть возрастающей, убывающей или постоянной.

Так, распределение Эрланга, усеченное нормальное распределение, гамма-распределение, распределение Вейбулла – Гнеденко описывают характеристики элементов систем с возрастающей функцией интенсивности отказов. Экспоненциальное распределение описывает системы с постоянной интенсивностью отказов. Логарифмически нормальное распределение используется для систем с убывающей функцией интенсивности отказов.

Надежность различных видов послепечатного полиграфического оборудования исследовалась с целью разработки теоретических основ структурного синтеза автоматизированных систем машин полиграфического производства [6]. Экспериментальные задачи оценки надежности полиграфического оборудования решаются с целью планирования ремонтов и поддержания оборудования в рабочем состоянии [7].

Для построения статистической модели надежности оборудования были рассмотрены следующие варианты распределения времени наработки на отказ: экспоненциальное, Вейбулла – Гнеденко, Эрланга, усеченное нормальное, логарифмически нормальное, нормальное. Для определения параметров распределений использовались уравнения связи этих параметров с математическим ожиданием времени t наработки на отказ μ и дисперсией D.

Законы распределения имеют следующий вид.

1. Экспоненциальное распределение

$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t}, \qquad (1)$$

где λ — параметр распределения, уравнение связи $\mu = 1 / \lambda$.

2. Распределение Вейбулла – Гнеденко

$$f(t) = \frac{\beta}{\theta}\left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta}\right], \qquad (2)$$

где β — параметр асимметрии; θ — параметр, определяющий масштаб; уравнения связи для параметров $\mu = \theta\Gamma(1 + 1 / \beta)$, $D = \theta^2\Gamma(1 + 2 / \beta) - \mu^2$ включают гамма-функцию $\Gamma(x)$.

3. Распределение Эрланга

$$f(t) = \alpha \frac{(\alpha t)^{n-1}}{(n-1)!} \exp(-\alpha t), \qquad (3)$$

где α — параметр масштаба; n — параметр формы; уравнения связи для параметров $\mu = n / \alpha$, $D = n / \alpha^2$.

4. Усеченное нормальное распределение

$$f(t) = \frac{a}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \exp\left(-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right), \qquad (4)$$

где параметр $a = \left[1 - \Phi\left(-\frac{\mu}{\sigma}\right)\right]^{-1}$ содержит интеграл вероятностей Φ, а уравнение связи для среднего квадратического отклонения σ и дисперсии D имеет вид $D = \sigma^2$.

5. Логарифмически нормальное распределение

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \exp\left(-\frac{(\ln t - \tau)^2}{2\sigma^2}\right), \qquad (5)$$

где τ — математическое ожидание натурального логарифма случайной величины t, обозначающей наработку на отказ, уравнения связи для параметров имеют вид $\mu = \exp[\tau + (\sigma^2/2)]$, $D = \exp(2\tau + \sigma^2)[\exp(\sigma^2) - 1]$.

6. Нормальное распределение

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right), \qquad (6)$$

где дисперсия случайной величины t связана с параметром распределения следующим образом: $D = \sigma^2$.

Для проверки гипотезы о законе распределения используется критерий χ^2 Пирсона.

После первичной обработки данных выяснилось, что некоторые значения вероятности отказа отстояли от остальных данных. Поскольку

этот факт мог бы привести к искажению при статистической обработке данных, то была применена коррекция Йетса [8], которая заключалась в ликвидации разрывов.

На рис. 2 показано соответствие теоретических законов распределения фактическим данным для печатной машины «Рапида 104». Видно, что фактические данные в наибольшей степени соответствуют распределениям, близким к экспоненциальному.

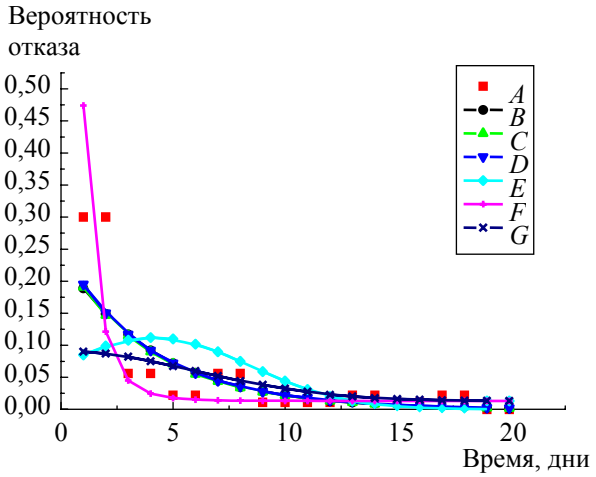

Рис. 2. Законы распределения отказов оборудования: *A* — фактические данные; *B* — экспоненциальное; *C* — Вейбулла – Гнеденко; *D* — Эрланга; *E* — усеченное нормальное; *F* — логарифмически нормальное; *G* — нормальное

В качестве примера в таблице приведены результаты расчета параметров, значений критерия Пирсона и дисперсии относительно закона распределения по данным отказов для печатный машины «Рапида 104» за 2005 г.

При проведении исследований обычно принимают уровень значимости $\alpha = 0{,}05$. Число степеней свободы

$$\nu = V - r - 1, \qquad (7)$$

где V — количество значений данных; r — количество независимых параметров в законе распределения. Таким образом, для однопараметрических распределений число степеней свободы $\nu_1 = 20 - 1 - 1 = 18$, для двухпараметрических $\nu_2 = 20 - 2 - 1 = 17$.

Сопоставляя табличное значение критерия Пирсона $\chi^2_{\alpha\nu}$ со значениями, рассчитанными по фактическим данным, видим, что гипотеза верна для экспоненциального распределения, а также распределений Вейбулла – Гнеденко и Эрланга. Вместе с тем параметр формы в распределении Эрланга n и параметр асимметрии в распределении Вейбулла – Гнеденко β получились практически равными единице. В результате оба эти распределения свелись к экспоненциальному закону, который для них является частным случаем. Данное обстоятельство фактически доказывает, что распределение является экспоненциальным.

Таким образом, для дальнейшего рассмотрения принимается, что закон распределения отказов печатных машин является экспоненциальным. Параметр λ экспоненциального распределения (1) характеризует интенсивность отказов.

Экспоненциальное распределение описывает системы с постоянной интенсивностью отказов на протяжении периода наработки на отказы, который равен одному году. За весь период наблюдений (6 лет) параметр изменялся.

Параметры распределения

Распределение, параметры	Значение параметров	Критерий Пирсона χ^2	Дисперсия относительно закона распределения	Табличное значение $\chi^2_{\alpha\nu}$
Экспоненциальное λ	 0,241	21,694	$2{,}684 \cdot 10^{-3}$	28,869
Вейбулла – Гнеденко β θ	 0,977 4,114	21,235	$2{,}65 \cdot 10^{-3}$	27,587
Эрланга α n	 0,230 0,955	20,468	$2{,}583 \cdot 10^{-3}$	27,587
Усеченное нормальное σ μ a	 4,156 4,253 1,197	76,113	$6{,}642 \cdot 10^{-3}$	27,587
Логарифмичеки нормальное σ μ	 0,777 –0,313	5385,000	$4{,}537 \cdot 10^{-3}$	27,587
Нормальное σ	 5,946	81,908	$6{,}077 \cdot 10^{-3}$	28,869

На рис. 3 показано изменение интенсивности отказов λ для двух печатных машин — «Рапида 104» и «Планета Р-44». У печатной машины «Рапида 104» с наименьшим сроком эксплуатации среди оборудования цеха (13 лет) интенсивность отказов имеет тенденцию к уменьшению, что позволяет все еще причислять ее к «молодеющему» оборудованию. У печатной машины «Планета Р-44» с наибольшим сроком эксплуатации (27 лет) интенсивность отказов увеличивается, что иллюстрирует характеристику этой машины как «стареющего» оборудования.

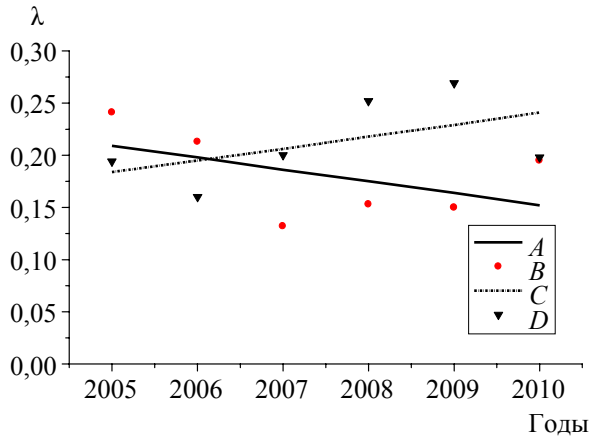

Рис. 3. Интенсивность отказов для машин: 1. «Рапида 104»: *A* — линейный тренд; *B* — фактические данные; 2. «Планета Р-44»: *C* — линейный тренд; *D* — фактические данные

Проведенный анализ основных и наиболее часто используемых в теории надежности моделей безотказной работы оборудования показывает, что ни одна из них не описывает все периоды его эксплуатации. На рис. 4 схематически показан принципиальный вид зависимости функции надежности от времени эксплуатации оборудования.

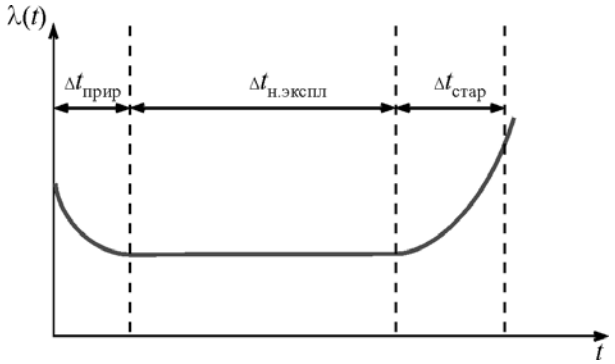

Рис. 4. Принципиальный вид зависимости функции надежности от времени эксплуатации оборудования

Полное время эксплуатации оборудования, как правило, разбивается на 3 периода: 1) приработки и опытной эксплуатации; 2) нормальной эксплуатации в соответствии с требованиями нормативной документации; 3) физического старения, период, характеризующийся ростом интенсивности отказов, проявлением накопления различных дефектов вследствие старения элементов оборудования. В некоторых случаях вводится и четвертый период — выведения оборудования из эксплуатации. Поскольку на протяжении этого периода оборудование используется все меньше, то интенсивность отказов может снижаться.

Таким образом, актуальной является задача построения модели безотказности, описывающей полное эксплуатационное время работы оборудования.

Обобщенная аналитическая функция интенсивности отказов оборудования. Для целей построения данной функции предлагается использовать функцию жизненного цикла эксплуатации оборудования (ЖЦО) [9, 10]. Достоинством функции ЖЦО является то, что она описывает все периоды его эксплуатации.

Уравнение для функции ЖЦО имеет вид

$$y(t) = \frac{A}{1+10^{a-bt}}, \qquad (8)$$

где A — асимптота функции ЖЦО; a и b — параметры функции. Методика расчета этих параметров изложена в литературе [9].

Функция (8) может быть нормирована на асимптоту по формуле

$$I(t) = y(t) / A. \qquad (9)$$

Поскольку при отказах оборудование простаивает и не эксплуатируется, то для построения обобщенной аналитической функции интенсивности отказов положим, что эта функция обратно пропорциональна производной от функции ЖЦО:

$$\lambda(t) = \frac{C}{\dfrac{dI(t)}{dt}}, \qquad (10)$$

где C — коэффициент пропорциональности.

Учитывая (8) и (9), производную в (10) можно получить в явном аналитическом виде. Для удобства дальнейших вычислений введем для этой производной специальное обозначение:

$$F(t) = \frac{1}{\dfrac{dI(t)}{dt}} = \frac{(1+10^{a-bt})^2}{b10^{a-bt}\ln 10}. \qquad (11)$$

Коэффициент пропорциональности C можно определить, проинтегрировав левую и правую часть (10) по времени эксплуатации оборудования T_c. В результате получим для C следующее выражение:

$$C = \int_0^{T_c} \lambda(t)dt \Big/ \int_0^{T_c} F(t)dt\,. \qquad (12)$$

Подставим (12) в (10) и нормируем функцию отказов на общее количество отказов за период эксплуатации конкретной единицы оборудования:

$$L(t) = \frac{\lambda(t)}{\int_0^{T_C} \lambda(t)dt}\,. \qquad (13)$$

Полученная таким образом зависимость функции интенсивности отказов от времени (13) описывает полное эксплуатационное время работы оборудования.

Результаты вычисления аналитической функции интенсивности отказов для печатной машины «Рапида 104» приведены на рис. 5.

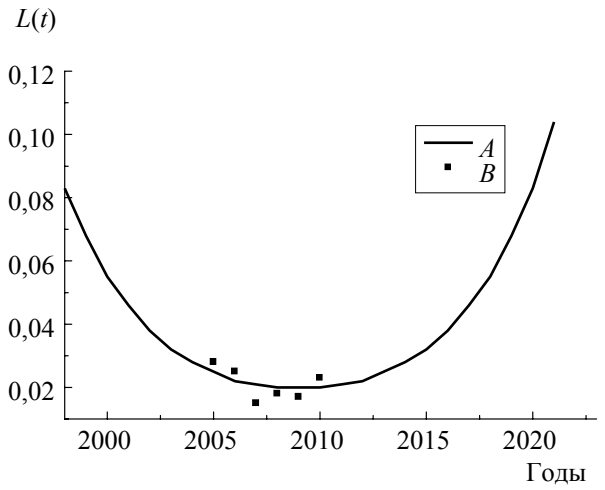

Рис. 5. Обобщенная функция надежности для печатной машины «Рапида 104»: *A* — теоретическая зависимость; *B* — статистические данные

Период нормальной эксплуатации оборудования, как следует из расчетов, представленных на рис. 5, отличается от схематического изображения на рис. 4. Этот период в свою очередь можно разбить на две части. На протяжении времени первой части интенсивность отказов замедленно уменьшается, и такое оборудование считается «молодеющим». Далее начинается медленный рост интенсивности отказов, что свидетельствует о переходе оборудования в категорию «стареющего». Достоинством построенной в данной работе обобщенной аналитической функции интенсивности отказов, как видно на рис. 5, является то, что она описывает и такие нюансы изменения интенсивности отказов реального печатного оборудования.

Заключение. Предложенная в статье методика и результаты моделирования надежности печатного оборудования позволяют решать широкий спектр задач по диагностике как печатного, так и других видов оборудования, разрабатывать мероприятия по профилактике отказов и предельных состояний, на новой методической базе решать задачи синтеза полиграфических машин и систем, а также более детально прорабатывать управленческие решения на этапах планирования и организации полиграфического производства.

Литература

1. Кулак, М. И. Методы теории фракталов в технологической механике и процессах управления: полиграфические материалы и процессы / М. И. Кулак, С. А. Ничипорович, Д. М. Медяк. — Минск: Белорусская наука, 2007. — 419 с.

2. Чепурна, К. О. Чинники виникнення дефектів відбитків, пов'язані з роботою фарбового апарата / К. О. Чепурна // Технологія і техніка друкарства. — 2005. — № 2. — С. 76–80.

3. Иванова, А. Е. Идентификация автоматизированных процессов печатного производства: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.13.06 / А. Е. Иванова. — М.: МГУП, 2006. — 24 с.

4. Методические указания. Надежность в технике. Общие правила классификации отказов и предельных состояний: РД 50-699-90. — Введ. 01.01.92. — М.: Госкомитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам, 1991. — 8 с.

5. Гнеденко, Б. В. Математические методы в теории надежности / Б. В. Гнеденко, Ю. К. Беляев, А. Д. Соловьев. — М.: Наука, 1965. — 524 с.

6. Бобров, В. И. Теоретические основы структурного синтеза автоматизированных систем машин полиграфического производства / В. И. Бобров. — М.: МГУП, 2004. — 238 с.

7. Волков, П. Н. Экспериментальные задачи надежности полиграфического оборудования / П. Н. Волков. — М.: МГУП, 1997. — 84 с.

8. Yates, F. Contingency tables involving small numbers and the chi-square test / F. Yates // Supplement to the Journal of the Royal Statistical Society. — 1934. — Vol. 1. — P. 222.

9. Ничипорович, С. А. Анализ жизненного цикла комплекта основного технологического оборудования полиграфических предприятий / С. А. Ничипорович, Е. С. Мирончик, О. В. Барушко // Труды БГТУ. Сер. IX, Издательское дело и полиграфия. — 2007. — Вып. XV. — С. 61–64.

10. Кулак, М. И. Фазовые траектории жизненных циклов в экономике / М. И. Кулак, С. А. Ничипорович, Н. Э. Трусевич // Доклады НАН Беларуси. — 2011. — Т. 55, № 2. — С. 117–124.

Поступила 28.03.2012