

УДК 658.3

А. С. Гуща, Н. Э. Трусевич

Белорусский государственный технологический университет

**СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИНТЕГРИРОВАННОГО ПОКАЗАТЕЛЯ
ОЦЕНКИ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ ПЕЧАТНОЙ УПАКОВОЧНОЙ ПРОДУКЦИИ**

В статье рассмотрен интегрированный показатель оценки технологичности печатной продукции, предложена методика его расчета. Модель позволяет учитывать взаимосвязи и взаимообусловленность частных свойств, из которых в итоге складывается интегральное качество печатной продукции. Приведена классификация отказов, возникающих на печатной стадии технологического процесса. Закон распределения отказов является экспоненциальным. Отказы оборудования могут приводить к повторному выполнению технологических операций, что увеличивает расход материалов, затраты и время на изготовление продукции, снижает экономическую эффективность производства.

Рассмотрены модели интенсивности отказов при выполнении технологических операций по причинам: отказы оборудования, влияние ошибок персонала, несоответствие материалов, несоблюдение технологии, несоответствие условий в цехах технологическим требованиям. При этом в обобщенную модель надежности технологических операций печатного производства включаются параметры рассмотренных функций интенсивности отказов. Наиболее полно специфику работы печатного оборудования отражает информация об его эксплуатации. Соответственно, на основе статистических данных рассчитаны параметры среднего времени наработки на отказ и нахождения в ремонтах печатной машины. Рассмотрена общая трудоемкость, в которой учтено увеличение времени за счет ремонтов по устранению причин отказов оборудования, а также потери материалов за один технологический отказ.

Ключевые слова: интегрированный показатель, экспоненциальный закон распределения, интенсивность отказов, трудоемкость, материалоемкость.

A. S. Gushcha, N. E. Trusevich

Belarusian State Technological University

**STATISTICAL MODEL OF THE INTEGRATED INDICATOR
OF THE ESTIMATION OF ADAPTABILITY TO MANUFACTURE
OF PRINTING PACKING PRODUCTION**

The article deals with the integrated indicator estimation of adaptability to manufacture of a printed matter, the technique of its calculation is offered. The model allows to consider interrelations and interconditionality of private properties resulting in the integrated quality of a printed matter. Classification of the refusals arising at a printing stage of technological process is given. The law of refusals distribution is exponential. Equipment refusals can lead to repeated performance of technological operations that increases the expense of materials, cost and time for production manufacturing, reduces economic efficiency of manufacture.

Failure rate models are considered at performance of technological operations for the following reasons: refusals of the equipment, influence of the personnel's errors, discrepancy of materials, nonobservance of technology, discrepancy of conditions to technology requirements in shops. Thus the generalised model of reliability of technological operations of printing manufacture includes parameters of the considered functions of failure rate. Specificity of work of the printing equipment is mostly reflected by the information of its operation. Accordingly, average time parameters are calculated taking into account a failure rate and periods of printing machine repairing. The general labour intensity in which the increase in time at the expense of repairs on elimination of causes of the equipment failures is considered, as well as material loss for one technological failure.

Key words: the integrated indicator, the exponential law of distribution, failure rate, labour input, material input.

Введение. Обеспечение технологичности печатной продукции – задача процесса технологической подготовки производства, предусматривающая взаимосвязанное рассмотрение вопросов конструкции изданий и технологии их изготовления. Решение этой задачи направ-

лено на повышение производительности труда, достижение оптимального уровня затрат трудовых и материальных ресурсов, сокращение времени выполнения заказов.

При оценке конструкции изделий и отработки их на технологичность необходимо обеспечивать,

на основе достижения технологической рациональности и оптимальности, конструкторской и технологической преемственности, максимальную экономическую эффективность при изготовлении и использовании продукции.

Интегрированный показатель оценки технологичности продукции. Система показателей технологичности состоит из трех групп: основные, дополнительные и вспомогательные [1].

Основные показатели комплексно характеризуют технологичность изделия с точки зрения затрат на его производство. К ним относятся трудоемкость, материалоемкость и элементоемкость, технологическая себестоимость.

Дополнительные (оценочные) показатели определяют целесообразность затрат на создание высокой технологичности и степени влияния на производство изготовления технологически обработанного изделия. К ним относятся серийность конструкции изделия, уровень организации производства и труда при его изготовлении.

Вспомогательные (частные) показатели характеризуют одно какое-либо свойство технологичности и являются, как правило, исходной базой для расчета основных и дополнительных показателей. Вспомогательные показатели всегда относительны и в большинстве случаев представляют собой коэффициенты, которые можно разделить на три подгруппы: конструктивные, технологические и комплексные.

Интегрированный показатель обобщает частные показатели, которые характеризуют тот или иной вид продукции. Возможно несколько способов вычисления интегрированного показателя по известным частным показателям. Наиболее простой способ — это вычислять интегрированный показатель как среднее арифметическое от частных показателей. Однако если один или несколько частных показателей существенно меньше остальных, то они будут формировать заниженную оценку интегрированного показателя. Аналогичный результат получится, если интегрированный показатель вычислять как среднее геометрическое.

От указанных недостатков свободен способ вычисления интегрированного показателя как радиус-вектора в пространстве частных показателей [2].

В случае наличия обобщенных показателей для трех групп интегрированный показатель рассчитывается по формуле

$$I = \sqrt{\frac{G_{\text{осн}}^2 + G_{\text{доп}}^2 + G_{\text{всп}}^2}{3}}, \quad (1)$$

где I — интегрированный показатель оценки технологичности печатной продукции; $G_{\text{осн}}$ — обобщенный показатель для группы основных показателей; $G_{\text{доп}}$ — обобщенный показатель

для группы дополнительных показателей; $G_{\text{всп}}$ — обобщенный показатель для группы вспомогательных показателей.

Обобщенный показатель для группы основных показателей, в свою очередь, может быть рассчитан по формуле

$$G_{\text{осн}} = \sqrt{\frac{W^2 + M^2 + C^2}{3}}, \quad (2)$$

где W — трудоемкость; M — материалоемкость; C — технологическая себестоимость.

Входящие в формулу (2) показатели имеют следующую размерность:

- 1) W — человеко-часы;
- 2) M — кг, или м^2 , или погонные метры;
- 3) C — руб/ед. продукции.

Поскольку показатели имеют разную размерность, то в формулу (2) нельзя подставлять их физические значения. Необходимо перейти к относительным значениям показателей, которые будут обезразмерены. Но для того чтобы провести такую процедуру, необходимо ввести базовые показатели. Универсальных показателей, которые могут быть использованы в качестве базовых для любого вида печатной продукции, в настоящее время не существует. Разработка такой системы показателей — сложная задача, которая, возможно, будет решена в будущем. Проблема несколько упрощается, если рассматривать отдельные виды печатной продукции.

Наиболее изученной полиграфической продукцией является книжная. Для книжной продукции принят условный экземпляр в десятилистном исчислении. Это книга форматом 60×90/16, объемом 10 физических печатных листов. Приведенный экземпляр газет — четырехполосная газета формата А2. Для упаковки принята условная объемная банка — жестяная банка № 8 вместимостью 353,4 см^3 , а условная весовая банка — 400 г.

Если использовать характеристики условных видов продукции в качестве базовых, то показатели в формуле (2) могут быть обезразмерены следующим образом. Например, для книжной продукции.

Приведенная трудоемкость

$$W_{\text{от}} = \frac{W}{W_0}, \quad (3)$$

где W_0 — трудоемкость изготовления условного экземпляра в качестве базового в десятилистном исчислении. Для определения W_0 можно взять типовой технологический процесс.

Приведенная материалоемкость

$$M_{\text{от}} = \frac{M}{M_0}, \quad (4)$$

где M_0 — материалоемкость изготовления условного экземпляра в десятилистном исчислении. Для расчета M_0 можно использовать стандарты на конкретные виды книг, например учебную, художественную, детскую литературу.

Приведенная технологическая себестоимость

$$C_{от} = \frac{C}{C_0}, \quad (5)$$

где C_0 — технологическая себестоимость изготовления условного экземпляра в десятилистном исчислении. Для расчета C_0 необходимо проанализировать фактические данные по себестоимости изготовления книжной продукции для передовых предприятий.

С учетом формул (3)–(5) формула (2) может быть записана в следующем виде:

$$G_{осн} = \sqrt{\frac{W_{от}^2 + M_{от}^2 + C_{от}^2}{3}}. \quad (6)$$

Входящие в формулу (6) характеристики являются безразмерными и могут сопоставляться между собой.

Предложенная методика расчета интегрированного показателя технологичности позволяет получать ее оценки не только для одинаковых видов печатной продукции, но и сопоставлять по этому критерию продукцию разных видов между собой.

Решение задачи нормирования расхода материалов на технологических операциях в общем случае распадается на две подзадачи. Это связано с тем, что норма расхода n явно или неявно состоит из двух частей n_v и n_z :

$$n = n_v + n_z. \quad (7)$$

В ряде случаев норма указывается в безразмерном виде, тогда формула (7) может быть преобразована:

$$n = 1 + \frac{n_z}{n_v}. \quad (8)$$

Первая часть нормы n_v в формулах (7) и (8) устанавливается относительно просто, поскольку она определяет количество материала в объеме изделия или полуфабриката. Вторая часть нормы — n_z характеризует запас материала. Необходимость в нем диктуется тем объективным обстоятельством, что технологическое оборудование и выполняемые на нем операции не имеют абсолютной надежности. Отказы оборудования могут приводить к необходимости повторного выполнения операций, а это, в свою очередь, увеличивает расход материалов.

Соответственно, первая подзадача нормирования расхода материалов по своей сути и характеру является относительно простой

расчетной технологической задачей. Вторая подзадача неизмеримо сложнее, поскольку для ее решения необходимо исследовать надежность технологического оборудования, причины и виды его отказов. Таким образом, эта подзадача имеет исследовательский характер.

В настоящее время существует несколько классификаций причин отказов полиграфического оборудования. Они подробно рассмотрены в статьях [3, 4]. Там же предложено разбивать отказы на следующие 5 групп:

- 1) отказы оборудования;
- 2) ошибки персонала;
- 3) несоответствие материалов;
- 4) нарушение технологии;
- 5) условия в цехах.

Установлено, что распределения отказов печатного оборудования подчиняется экспоненциальному закону [3]:

$$f(t) = \exp(-\lambda_{по}t), \quad (9)$$

где $\lambda_{по}$ — параметр распределения; t — время наблюдения.

Параметр $\lambda_{по}$ экспоненциального распределения (9) характеризует интенсивность отказов.

Модель оценки влияния ошибок персонала на интенсивность отказов при выполнении технологических операций построена в работе [5]. Она позволяет оценивать вероятность появления отказа как из-за несоответствия квалификации работника требуемому уровню, так и в связи с увеличением его стажа и возраста.

Влияние квалификации сотрудников на интенсивность отказов может быть описано логистической функцией [5]:

$$\lambda_{сот}(\delta_k) = \alpha_{сот} \cdot \left[1 + \frac{1}{1 + 10^{a - b\delta_k}} \right], \quad (10)$$

где $\alpha_{сот}$ — коэффициент; a и b — параметры функции. Расчет δ_k осуществляется с использованием квалификационных коэффициентов, которые присваиваются каждому сотруднику исходя из его тарифного разряда и уровня образования:

$$\delta_k = k_6 - k_\phi, \quad (11)$$

где k_6 — базовый квалификационный коэффициент, требуемый для выполнения конкретной работы с целью минимизировать число отказов; k_ϕ — фактический квалификационный коэффициент конкретного работника, занятого на должности.

Зависимость интенсивности отказов от стажа работы сотрудника определяется по формуле

$$\lambda_{ст}(t_p) = \alpha_{ст} (1 + |z(T_k) - z(t_p)|), \quad (12)$$

где z — квалификация работника; T_k — стаж сотрудника, после которого увеличивается

интенсивность отказов ($T_k = 25$ лет); t_p — стаж работы; $\alpha_{ст}$ — коэффициент ($\alpha_{ст} = 0,112$).

Совместное влияние квалификации и стажа работы сотрудников на интенсивность отказов определяется по следующей формуле:

$$\lambda_{cc}(t_p) = \sqrt{\frac{\lambda_{cot}^2(\delta_k) + \lambda_{ст}^2(t_p)}{2}}, \quad (13)$$

где δ_k — фиксированное значение разности квалификационных коэффициентов.

Модель интенсивности отказов по причине несоответствия материалов на примере пылимости бумаги позволяет оценивать вероятность появления отказа вследствие превышения значения пылимости над критическим, что делает возможным принятие управленческих решений, направленных на разработку мероприятий по профилактике отказов печатного оборудования, снижение расхода материалов и затрат на изготовление продукции, повышение экономической эффективности производства [6].

Влияние пылимости бумаги на интенсивности отказов может быть описано логистической функцией:

$$\lambda_{пб}(\delta_d) = \alpha_{пб} \cdot \left[1 + \frac{1}{1 + 10^{a-b\delta_d}} \right], \quad (14)$$

где $\alpha_{пб}$ — коэффициент; a и b — параметры функции.

Отклонение δ_d значения пылимости бумаги от критического определяется в относительных единицах:

$$\delta_d = \frac{d_{\phi} - d_k}{d_k}, \quad (15)$$

где d_{ϕ} — фактическое значение пылимости бумаги; d_k — критическое значение пылимости бумаги.

Несоблюдение технологических режимов подготовки машин к печатанию, неправильная подготовка материалов, недостаточный контроль процесса печатания приводят к неполадкам при печати продукции и к снижению ее качества. Одним из дефектов, возникающих в результате несоблюдения технологии, является несовмещение красок.

С увеличением разброса приводочных крестов, напечатанных разными красками, ухудшается качество печати и, соответственно, увеличивается число отказов. Данная зависимость описывается уравнением логистической кривой, которое имеет вид:

$$\lambda_{нс}(\delta_m) = \alpha_{нс} \cdot \left[1 + \frac{1}{1 + 10^{a-b\delta_m}} \right], \quad (16)$$

где $\alpha_{нс}$ — коэффициент; a и b — параметры функции.

Отклонение δ_m от критического несовмещения красок на оттиске определяется в относительных единицах по формуле

$$\delta_m = \frac{m_{\phi} - m_k}{m_{\phi}}, \quad (17)$$

где m_{ϕ} — фактическое несовмещение красок; m_k — критическое несовмещение красок.

Температура и влажность воздуха в типографии оказывают существенное влияние на поведение полиграфических материалов.

Интенсивность отказов по причине несоответствия условий в цехах технологическим требованиям может быть описана логистической функцией:

$$\lambda_{ку}(w_0) = \alpha_{ку} \cdot \left[1 + \frac{1}{1 + 10^{a-bm(w_0)}} \right], \quad (18)$$

где $\alpha_{ку}$ — коэффициент; a и b — параметры функции; w_0 — относительная влажность воздуха в помещении.

В обобщенную модель надежности технологических операций печатного производства включаются все параметры рассмотренных ранее функций интенсивности отказов. Для построения обобщенной модели используется следующая формула:

$$\lambda(t, t_p, \delta_d, \delta_m, w_0) = \sqrt{\frac{\lambda_{по}^2(t) + \lambda_{cot}^2(t_p) + \lambda_{cc}^2(\delta_d) + \lambda_{пб}^2(\delta_m) + \lambda_{ку}^2(W)}{5}}. \quad (19)$$

Для экспоненциального закона распределения времени безотказной работы имеет вид [7]:

$$T_0 = \int_0^{\infty} e^{-\lambda_{по}t} dt = \frac{1}{\lambda_{по}}, \quad (20)$$

где $\lambda_{по}$ — параметр распределения; t — время наблюдения.

Для печатной машины «Рапида 104» обработка приведенных в [3] статистических данных об отказах за 2005–2010 гг. позволила установить, что среднее время наработки на отказ составляет $T_{оч} = 92,9$ ч, а среднее время нахождения в ремонтах — $T_{рч} = 1,8$ ч.

Рабочее время, затраченное на изготовление продукции P_b , определяется по формуле:

$$P_b = \sum_{i=1}^{n_s} t_i Q_i, \quad (21)$$

где i — текущая операция при изготовлении продукции; n_s — общее количество операций; t_i — норма времени на выполнение операции i ; Q_i — объем работы.

Для нахождения количества отказов за время выполнения заказа используется формула

$$N_{\text{отк}} = \frac{P_{\text{в}}}{T_{\text{оч}}}. \quad (22)$$

Увеличение времени за счет ремонтов по устранению причин отказов оборудования определяется следующим образом:

$$\delta T = N_{\text{отк}} T_{\text{рч}} = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n_s} t_i Q_i \right) T_{\text{рч}}}{T_{\text{оч}}}. \quad (23)$$

Соответственно, общая трудоемкость W , с учетом увеличения времени, составит

$$W = \frac{1}{V_{\text{п}}} (P_{\text{в}} + \delta T) = \frac{\sum_{i=1}^{n_s} t_i Q_i}{V_{\text{п}}} \left(1 + \frac{T_{\text{рч}}}{T_{\text{оч}}} \right), \quad (24)$$

где $V_{\text{п}}$ — объем продукции, производимой при выполнении заказа.

Потери материалов за один технологический отказ δM могут быть определены по формуле [8]:

$$\delta M = K_{\text{т2}} N_0 = K_{\text{т2}} Q_{\text{н}} T_{\text{оч}}, \quad (25)$$

где $K_{\text{т2}}$ — коэффициент выхода годной продукции с учетом брака; N_0 — количество выпущенной продукции за время наработки на отказ; $Q_{\text{н}}$ — номинальная производительность системы, т. е. производительность, которой обладала бы система, если бы она работала бесперебойно.

Расход материалов $M_{\text{в}}$ определяется по следующей формуле

$$M_{\text{в}} = V_{\text{п}} n_{\text{в}}. \quad (26)$$

С учетом (25) и (26) общая материалоемкость M составит:

$$M = \frac{M_{\text{в}} + \delta M}{V_{\text{п}}} = n_{\text{в}} + \frac{K_{\text{т2}} Q_{\text{н}} T_{\text{оч}}}{V_{\text{п}}}. \quad (27)$$

Себестоимость не исследуется, так как необходимо собрать и проанализировать фактические данные по себестоимости изготовления печатной упаковочной продукции на предприятиях.

Необходимо рационально использовать рассмотренные показатели, имеющие наиболее существенное влияние на технологичность печатной упаковочной продукции при существующих условиях производства.

Результаты расчетов и исследования модели будут представлены в последующих публикациях.

Заключение. Все рассмотренные показатели технологичности взаимосвязаны. Группа основных показателей является обязательной для оценки печатной продукции в целом, а также ее составных частей. Для правомерности суммирования данных показателей необходимо привести их к безразмерным величинам. Это достигается использованием при суммировании относительных значений показателей технологичности.

Распределения отказов печатного оборудования подчиняется экспоненциальному закону. Чем более продолжительными являются отказы, тем меньше производительность, соответственно, увеличивается время на изготовление печатной упаковочной продукции. Безотказная работа оборудования позволяет повысить оперативность операций и качество печатной продукции.

Литература

1. Войчинский А. М., Янсон Э. Ж. Технологичность изделий в приборостроении. Л.: Машиностроение, 1988. 232 с.
2. Методологические подходы по формированию структуры жизненного цикла организации как полидинамической системы / М. И. Кулак [и др.] // Доклады НАН Беларуси. Т. 51. 2007. № 4. С. 124–129.
3. Теоретическая оценка надежности печатного оборудования на стадиях его жизненного цикла / М. И. Кулак [и др.] // Труды БГТУ. 2012. № 9: Издат. дело и полиграфия. С. 27–32.
4. Теоретическое исследование отказов печатного оборудования на стадии выведения из эксплуатации / М. И. Кулак [и др.] // Труды БГТУ. 2013. № 8: Издат. дело и полиграфия. С. 39–42.
5. Трусевич Н. Э. Модель оценки влияния ошибок персонала на интенсивность отказов при выполнении технологических операций // Труды БГТУ. 2014. № 9: Издат. дело и полиграфия. С. 76–83.
6. Трусевич Н. Э. Влияние пылимости бумаги на отказы печатного оборудования // Труды БГТУ. 2015. № 9: Издат. дело и полиграфия. С. 76–83.
7. Голуб Н. С., Кулак М. И. Надежность кондитерского упаковочного оборудования // Труды БГТУ. 2014. № 9: Издат. дело и полиграфия. С. 42–47.
8. Голуб Н. С., Кулак М. И. Взаимосвязь комплексных показателей надежности и производительности упаковочного оборудования // Труды БГТУ. 2014. № 9: Издат. дело и полиграфия. С. 48–51.

References

1. Voychinskiy A. M., Yanson E. G. *Tehnologichnost' izdeliy v priborostroenii* [Technological effectiveness of products in instrument making]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1988. 232 p. (In Russian).

2. Kulak M. I., Nichiporovich S. A., Trusevich N. E., Mironchik E. S. Methodological approaches on formation of structure of life cycle of the organization as polydynamic system. *Doklady NAN Belarusi* [Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus], 2007, vol. 51, no. 4, pp. 124–129 (In Russian).

3. Kulak M. I., Trusevich N. E., Sakulevich T. A., Kharitonchik I. V. Theoretical assessment of reliability of the printing equipment at stages of its life cycle. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2012, no. 9: Publishing and Printing, pp. 27–32 (In Russian).

4. Trusevich N. E., Kulak M. I., Sakulevich T. A., Kharitonchik I. V. Theoretical research of refusals of print equipment at the stage of removal from operation. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2013, no. 8: Publishing and Printing, pp. 39–42 (In Russian).

5. Trusevich N. E. Model of an assessment of influence of errors of the personnel on failure rate when performing technological operations. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2014, no. 9: Publishing and Printing, pp. 76–83 (In Russian).

6. Trusevich N. E. Influence of dusting of paper on the printing equipment failure. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2015, no. 9: Publishing and Printing, pp. 76–83 (In Russian).

7. Golub N. S., Kulak M. I. Reliability confectionery packing equipment. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2014, no. 9: Publishing and Printing, pp. 42–47 (In Russian).

8. Golub N. S., Kulak M. I., Complex relationship reliability indices and performance packing equipment. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2014, no. 9: Publishing and Printing, pp. 48–51 (In Russian).

Информация об авторах

Гуца Алина Сергеевна – магистрант кафедры полиграфических производств, Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова 13а, Республика Беларусь). E-mail: alina.gushcha@mail.ru

Трусевич Надежда Эдуардовна – кандидат экономических наук, доцент кафедры полиграфических производств, Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова 13а, Республика Беларусь). E-mail: trusevich@belstu.by

Information about the authors

Gushcha Alina Sergeevna – undergraduate student of the Department of Printing Technologies, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: alina.gushcha@mail.ru

Trusevich Nadezhda Eduardovna – Ph. D. Economics, assistant professor of the Department of Printing Technologies, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: trusevich@belstu.by

Поступила 10.03.2015