

УДК 658.3

Н. Э. Трусевич, кандидат экономических наук, доцент (БГТУ)

### МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ОШИБОК ПЕРСОНАЛА НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ОТКАЗОВ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ

Главным ресурсом любой организации являются кадры, которые существенно влияют на результаты ее деятельности. Ошибки обслуживающего персонала могут быть причинами самых различных отказов процессов и производств. В статье предложена модель оценки влияния ошибок персонала на интенсивность отказов при выполнении технологических операций. Данная модель дает возможность количественно оценить влияние квалификации и стажа работы сотрудников на интенсивность отказов.

Shots are the main resource of any organization which significantly influence results of its activity. Errors of the service personnel can be the reasons of the most various refusals of processes and productions. In article the model of an assessment of influence of errors of the personnel on failure rate when performing technological operations is offered. This model gives the chance quantitatively to estimate influence of qualification and length of service of employees on failure rate.

**Введение.** Только постоянно модернизируя изделия, внедряя новые технологии, методы управления и организации, предприятия имеют возможность в течение длительного времени добиваться высоких показателей развития. В настоящее время общепризнано, что рационально организованный управленческий и технологический процесс, является необходимым условием для долгосрочного устойчивого функционирования промышленных предприятий. Необходимость в исследовании отказов диктуется тем объективным обстоятельством, что технологическое оборудование и выполняемые на нем операции не имеют абсолютной надежности [1, 2].

**Статистическая обработка данных об отказах по причине ошибок персонала.** В ходе 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 [3].

На рис. 1 показаны законы распределения отказов по причине ошибок персонала для печатной машины Rapida 104. График отражает, что из рассматриваемых законов распределения фактическим данным в наибольшей степени соответствуют три закона распределения: экспоненциальный, Эрланга и Вейбулла – Гнеденко. Близкие к единице параметр формы  $n$  в распределении Эрланга и параметр асимметрии  $\beta$  в конечном счете сводят оба эти распределения к экспоненциальному.

Расчет интенсивности отказов (параметра  $\lambda$ ) для экспоненциального закона распределения производился для печатной машины № 7 и ма-

шины Rapida 104. Результаты расчета приведены в табл. 1. Также в таблице указаны значения критерия Пирсона  $\chi^2$ , числа степеней свободы  $\nu$  для каждого случая и табличные значения критерия Пирсона.

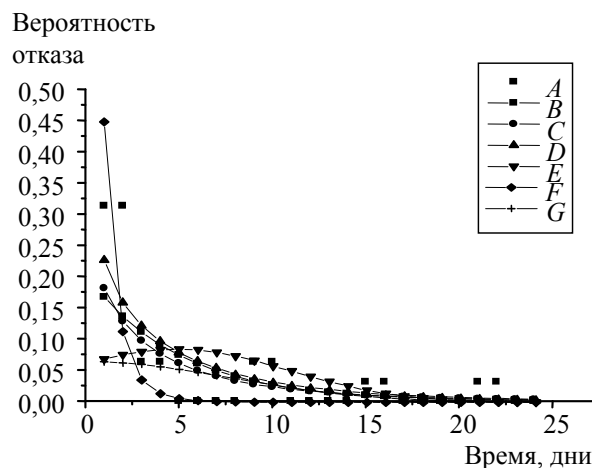


Рис. 1. Законы распределения отказов по причине ошибок персонала (2005 г.): A — фактические данные; B — экспоненциальное распределение; C — распределение Вейбулла – Гнеденко; D — распределение Эрланга; E — усеченное нормальное распределение; F — логарифмически нормальное распределение; G — нормальное распределение

Средние квадратические отклонения для рассматриваемых законов распределения приводятся в табл. 2. Результаты показывают, что наилучшее приближение обеспечивают линейная и экспоненциальная функции. Однако линейная функция предполагает равенство интенсивности отказов нулю в определенный момент времени, что неосуществимо на практике. Поэтому данная функция в качестве аппроксимирующей приниматься не может.

Таблица 1

**Параметры распределения**

Машина	Год	Распределение	Значение параметров	Критерий Пирсона $\chi^2$	Число степеней свободы $\nu$	Табличное значение $\chi^2_{\alpha\nu}$
Rapida 104	2005	Экспоненциальное	0,205	24,982	22	33,924
	2007		0,174	15,629	20	31,410
	2008		0,123	11,855	20	31,410
	2009		0,122	11,238	20	31,410
	2010		0,103	22,608	20	31,410
№ 7	2007	Экспоненциальное	0,105	21,001	26	38,885

Таблица 2

**Значения среднего квадратического отклонения**

Функция	Rapida 104
Линейная	$9,872 \cdot 10^{-3}$
Гиперболическая	0,012
Логарифмическая	0,013
Степенная	0,015
Экспоненциальная	$9,885 \cdot 10^{-3}$

**Влияние квалификации сотрудников на интенсивность отказов.** Кадры являются главным ресурсом любого предприятия. Результаты деятельности предприятия, его конкурентоспособность во многом зависят от их качества и эффективности использования. Человеческий фактор играет ключевую роль при возникновении отказов. Ошибки обслуживающего персонала могут быть причинами самых различных отказов процессов и производств, включая аварии. Источниками ошибок могут послужить недостаточный уровень профессиональных знаний и навыков, нарушения трудовой дисциплины, усталость и др. Соответственно, можно предположить, что интенсивность отказов будет тем больше, чем больше разница между профессиональным уровнем работника, занятого на конкретной должности, и требуемым уровнем для выполнения данной работы. Данная зависимость может быть описана логистической кривой:

$$\lambda(\delta_k) = \alpha \left[ 1 + \frac{1}{1 + 10^{a-b\delta_k}} \right], \quad (1)$$

где  $a$  и  $b$  — параметры функции.

Коэффициент  $\alpha$  подбирается таким образом, чтобы перекрывался диапазон значений  $\lambda$ , полученный после статистической обработки данных об отказах этого вида. В данном случае значение  $\alpha$  равно 0,102.

Расчет  $\delta_k$  осуществляется с использованием квалификационных коэффициентов, которые присваиваются каждому сотруднику, исходя из его тарифного разряда и уровня образования:

$$\delta_k = k_B - k_\Phi, \quad (2)$$

где  $k_B$  — базовый квалификационный коэффициент, требуемый для выполнения конкретной работы с целью минимизировать число отказов;  $k_\Phi$  — фактический квалификационный коэффициент конкретного работника, занятого на должности.

Квалификационные коэффициенты распределены по шкале от 0 до 1 в виде геометрической прогрессии со знаменателем 1,122. Квалификационные коэффициенты приведены в табл. 3 [1].

Таблица 3

**Квалификационные коэффициенты**

Тарифный разряд, образование	Квалификационный коэффициент $k_{ij}$
2-й, без спецобразования	0,159
2-й, среднее специальное	0,178
2-й, среднее техническое	0,200
3-й, без спецобразования	0,224
3-й, среднее специальное	0,251
3-й, среднее техническое	0,282
4-й, без спецобразования	0,316
4-й, среднее специальное	0,355
4-й, среднее техническое	0,398
5-й, без спецобразования	0,447
5-й, среднее специальное	0,501
5-й, среднее техническое	0,562
5-й, высшее	0,631
6-й, без спецобразования	0,708
6-й, среднее специальное	0,794
6-й, среднее техническое	0,891
6-й, высшее	1,000

График зависимости интенсивности отказов от разности базового и фактического квалификационных коэффициентов приведен на рис. 2.

На логистической кривой можно выделить три характерных участка. Для первого пологого участка свойственно медленное возрастание интенсивности отказов, причем при  $\delta_k = 0$  интенсивность отказов всегда имеет отличное от 0 значение ( $\lambda_0$  — значение интенсивности отказов при  $\delta_k = 0$ ).

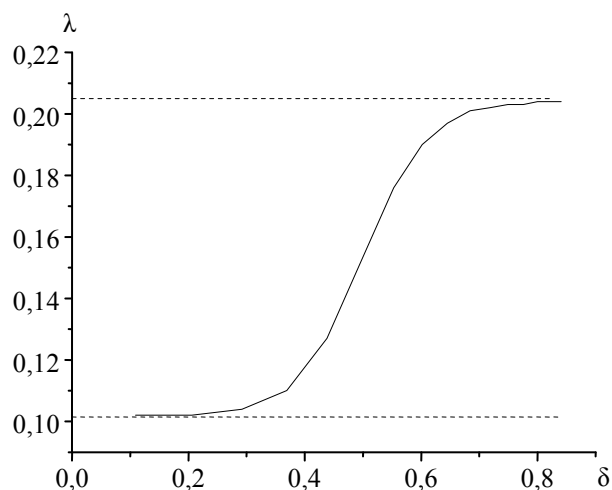


Рис. 2. График зависимости интенсивности отказов от разности квалификационных коэффициентов

Второй участок отличается устойчивым и равномерным ростом интенсивности отказов. Этот участок близок к наклонной прямой линии.

Для третьего, снова пологого, участка характерно постепенное снижение темпа роста интенсивности отказов и асимптотическое приближение к верхнему предельному уровню.

Обобщенная модель интенсивности отказов по причине ошибок персонала может быть описана дифференциальным уравнением Ферхюльста – Перла:

$$\frac{d\lambda}{d\delta_k} = k\lambda(A - \lambda), \quad (3)$$

где  $\lambda$  — интенсивность отказов при некотором значении разности квалификационных коэффициентов  $\delta_k$ ;  $A$  — асимптота логистической кривой;  $k$  — параметр задачи.

Решением уравнения (3) является логистическая кривая:

$$\lambda(\delta_k) = \frac{A}{1 + \frac{A - \lambda_0}{\lambda_0} e^{-kA\delta_k}}. \quad (4)$$

Переопределяем коэффициенты:

$$C = \frac{A - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{A}{\lambda_0} - 1; \quad (5)$$

$$\lambda'(\delta_k) = \frac{\lambda(\delta_k)}{A}. \quad (6)$$

Тогда выражение для логистической кривой примет вид

$$\lambda'(\delta_k) = \frac{1}{1 + Ce^{-kA\delta_k}} \quad (7)$$

или

$$\lambda'(\delta_k) = \frac{1}{1 + 10^{a-b\delta_k}}. \quad (8)$$

Исходя из выражений (7) и (8), можно получить выражения, связывающие параметры  $a$  и  $b$  логистической кривой с решением уравнения (3):

$$a = \lg C = \lg \left( \frac{A}{\lambda_0} - 1 \right), \quad (9)$$

$$b = kAM, \quad (10)$$

где  $M$  — модуль, равный  $\lg e$ .

Чтобы определить влияние параметров логистической кривой на ее вид, построим графики для случаев возникновения отказов на стадиях изготовления печатных форм и печати, причем для каждого случая переменным параметром полагаем  $b$  ( $a = \text{const}$ ,  $b = \text{var}$ ), а затем параметр  $a$  ( $a = \text{var}$ ,  $b = \text{const}$ ). Значения параметров  $a$  и  $b$  подбирались исходя из того, чтобы на графике функции был хорошо виден каждый участок. Результаты исследования отражены на рис. 3–6.

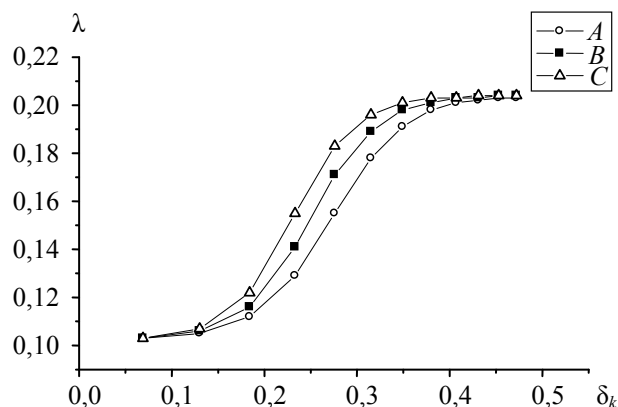


Рис. 3. Логистические кривые интенсивности отказов по причине ошибок персонала на стадии изготовления печатных форм при  $a = \text{const}$ ,  $b = \text{var}$ :  
 $A — b = 11$ ;  $B — b = 12$ ;  $C — b = 13$

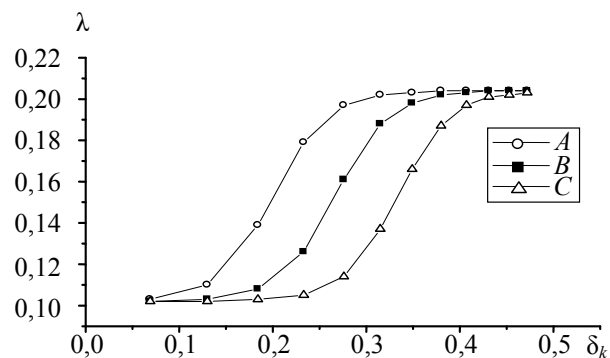


Рис. 4. Логистические кривые интенсивности отказов по причине ошибок персонала на стадии изготовления печатных форм при  $a = \text{var}$ ,  $b = \text{const}$ :  
 $A — a = 3$ ;  $B — a = 4$ ;  $C — a = 5$

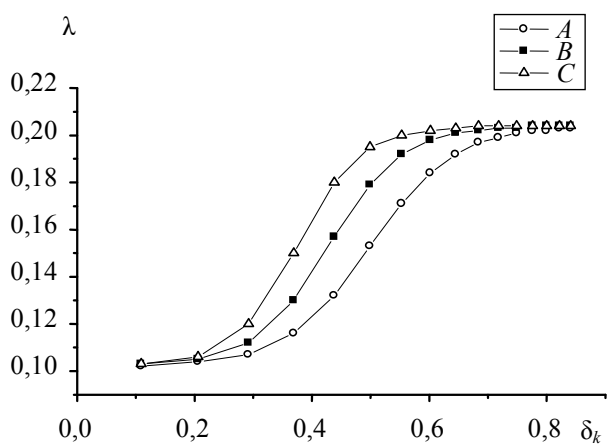


Рис. 5. Логистические кривые интенсивности отказов по причине ошибок печатников при  $a = \text{const}$ ,  $b = \text{var}$ :  
 $A — b = 6$ ;  $B — b = 7$ ;  $C — b = 8$

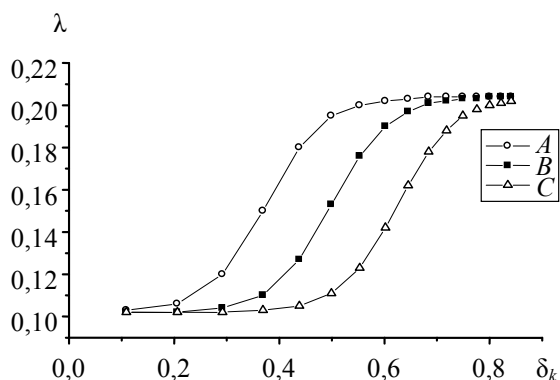


Рис. 6. Логистические кривые интенсивности отказов по причине ошибок печатников при  $a = \text{var}$ ,  $b = \text{const}$ :  
 $A — a = 3$ ;  $B — a = 4$ ;  $C — a = 5$

Анализ рис. 3 позволяет прийти к выводу, что при увеличении параметра  $b$  увеличивается угол наклона второго участка, а также уменьшается ширина первого и увеличивается ширина последнего участков кривой. Ширина наклонного участка незначительно изменяется, а его положение относительно оси абсцисс остается практически неизменным.

Значения  $\lambda_0 / A$  и  $kA$  рассчитываются по формулам (9) и (10) соответственно. Исходя из связи с параметрами кривой  $a$  и  $b$ , данные значения позволяют проанализировать кинетику процесса. Так как в данном случае изменялся только параметр  $b$ , то логично предположить, что будет изменяться  $kA$ , а отношение  $\lambda_0 / A$  останется постоянным.

Как видно, с увеличением  $b$  значения  $kA$  также возрастают, т. е. будет наблюдаться более резкий скачок интенсивности отказов при увеличении разницы между фактическим уровнем работника и требуемым уровнем для выполнения операции  $\delta_k$ . Таким образом, можно сказать, что повышается скорость процесса и

интенсивность отказов раньше приблизится к некоторому максимальному значению при условии, что резкий рост интенсивности начнется при одном и том же значении  $\delta_k$ .

При изменении параметра  $a$  можно наблюдать обратную ситуацию в сравнении с предыдущим случаем. С увеличением значения параметра  $a$  ширина первого участка увеличивается, а третьего участка — уменьшается. Данный факт можно связать со смещением наклонного второго участка вправо по оси абсцисс. Визуально ширина этого участка практически не изменяется, как и наклон кривой.

Значение  $\lambda_0 / A$  в рассматриваемом случае изменяется, а  $kA$  остается неизменным. При увеличении параметра  $a$  отношение  $\lambda_0 / A$  становится меньше. Связывая данный факт с процессом, можно утверждать, что разность квалификационных коэффициентов будет оказывать меньшее влияние на интенсивность отказов, увеличится время наступления скачка интенсивности. Таким образом, стремительный рост интенсивности отказов начнется при значительно больших разностях фактического и базового уровней персонала.

Результаты анализа графика интенсивности отказов по причине ошибок печатников, когда изменяется параметр  $b$ , а  $a$  остается постоянным, совпадают с аналогичным случаем, когда ошибки возникают на стадии изготовления печатных форм (или монтажа). Тем не менее, так как увеличился общий диапазон кривой, наблюдаемые изменения заметны сильнее. Как и в рассмотренном выше случае, здесь также наблюдается увеличение скорости протекания процесса, о чем можно судить по значениям  $kA$ .

При условии, что  $a = \text{var}$ ,  $b = \text{const}$ , изменения вида логистической кривой идентичны аналогичному случаю возникновения отказов на стадии изготовления печатных форм. В этом случае также наблюдается смещение наклонного участка по оси абсцисс, сохранение его ширины и наклона кривой. Анализ изменения значений  $\lambda_0 / A$  и  $kA$  соответствует случаям, рассмотренным ранее.

Таким образом, из рисунков видно, что параметры  $a$  и  $b$  определяют наклон и изгиб логистической кривой, а также положение наклонного участка относительно оси абсцисс. Параметр  $a$  определяет изгиб линии в верхней и нижней частях, причем наклон линии среднего участка и, соответственно, ширина этого участка остаются неизменными, но изменяется его положение по оси абсцисс. Параметр  $b$ , наоборот, отвечает за наклон кривой на втором участке. Изменяется ширина участка, однако его поло-

жение относительно оси абсцисс сохраняется. Также, благодаря параметрам  $kA$  и  $\lambda_0 / A$  представляется возможным судить о кинетике процесса, т. е. о скорости его протекания и времени наступления скачка интенсивности отказов, характерного для логистической кривой.

Полученная модель интенсивности отказов по причине ошибок персонала позволит оценивать возможность возникновения отказа в связи с несоответствием квалификации работника требуемому уровню.

**Влияние стажа работы на интенсивность отказов.** В приведенных выше примерах рассматривалась лишь интеллектуальная составляющая кадрового потенциала работника, т. е. квалификация специалиста (уровень и система образования, знания, опыт и др.). Процесс повышения квалификации, накопления знаний и опыта в процессе трудовой деятельности может быть описан уравнением (11), а сама зависимость имеет вид логистической кривой, как показано на рис. 7.

$$z(t) = \frac{1}{1 + 10^{a-bt}}, \quad (11)$$

где  $z$  — квалификация работника;  $t$  — стаж работы;  $a$  и  $b$  — параметры функции.

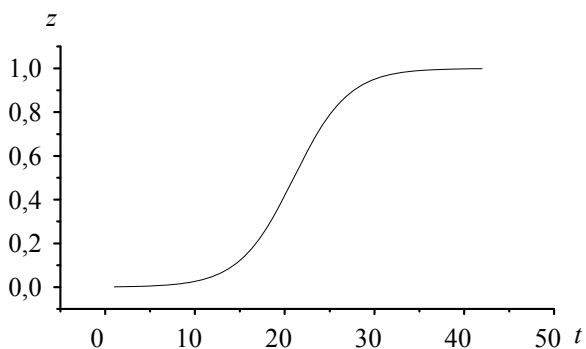


Рис. 7. График зависимости квалификации работника от его стажа

Тем не менее, нельзя не учитывать влияние физической составляющей кадрового потенциала на возникновение отказов. Возраст работника, а соответственно, его здоровье и физические возможности оказывают непосредственное влияние на гибкость и мобильность человека в работе, его активность, а также в некоторой степени и на производительность труда.

Следовательно, несмотря на повышение квалификации специалиста, в некоторый момент времени можно ожидать рост интенсивности отказов, допущенных по его вине. Зависимость интенсивности отказов от рабочего стажа

сотрудника отражена на рис. 7. Построение графика осуществлялось с учетом того, что период активной работы сотрудника до его выхода на пенсию составляет 42 года, а критической точкой, после которой увеличивается интенсивность отказов, является стаж работы, равный 25 лет. Формула, по которой рассчитывается интенсивность отказов в данном случае, выглядит следующим образом:

$$\lambda(t) = \alpha(1 + |z(T_k) - z(t)|), \quad (12)$$

где  $T_k$  — стаж сотрудника, после которого увеличивается интенсивность отказов ( $T_k = 25$  лет).

Коэффициент  $\alpha$ , как и в предыдущем случае, выбран так, чтобы диапазон интенсивностей совпадал со статистическими данными ( $\alpha = 0,112$ ).

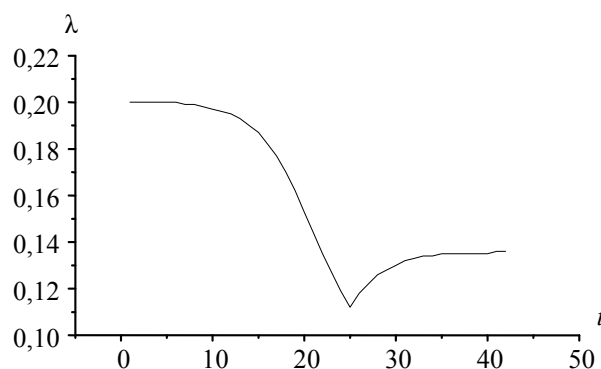


Рис. 8. График зависимости интенсивности отказов от рабочего стажа сотрудника

Так как в работе рассматриваются отказы, возникающие на стадии печати, то стоит учитывать, что обслуживание печатного оборудования осуществляется бригадой печатников. В таком случае интенсивность отказов будет зависеть не только от одного работника, но и от совместных действий всей бригады.

Чтобы рассчитать интенсивность отказов, которые возникают в процессе печати в результате ошибок бригады печатников, необходимо знать, какой вклад в эту величину приносят действия каждого из рабочих бригады. Интенсивность отказов по вине одного из печатников определяется с учетом (11) по следующей формуле:

$$\lambda_n(t_B) = \lambda(t_B + t_n - 1), \quad (13)$$

где  $\lambda_n$  — интенсивность отказов по причине  $n$ -го работника;  $t_B$  — стаж бригады;  $t_n$  — стаж  $n$ -го работника.

Тогда общая интенсивность отказов по вине бригады находится следующим образом:

$$\lambda(t_B) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \lambda_n^2(t_B)}{n}} \quad (14)$$

Зависимость интенсивности отказов по причине ошибок бригады приведена на рис. 9. В рассмотренном примере в бригаду входят 3 человека, стаж работы которых составляет 5, 20 и 35 лет соответственно при стаже бригады  $t_B = 1$  год. Далее стаж каждого печатника увеличивается, как и стаж бригады в целом. Бригада работает в данном составе на протяжении 7 лет.

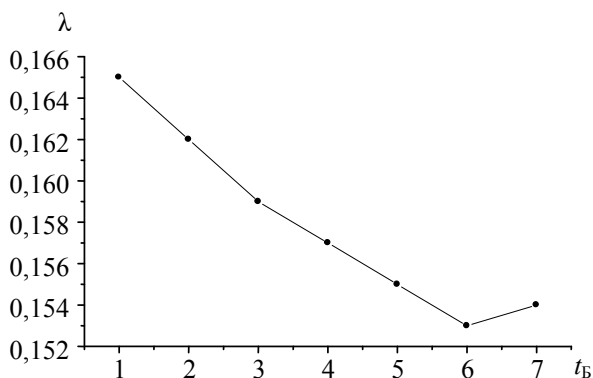


Рис. 9. График зависимости интенсивности отказов от стажа бригады

Из рисунка видно, что для бригады, как и для одного работника, также наблюдается рост интенсивности отказов после достижения определенного стажа работы. Логично предположить, что каждый член бригады в разной степени влияет на общее количество отказов, которые происходят по вине бригады. Для проверки этой гипотезы было рассмотрено три случая, в которых изменялся начальный стаж одного из печатников. В первом случае начальный стаж различался у наименее опытного работника.

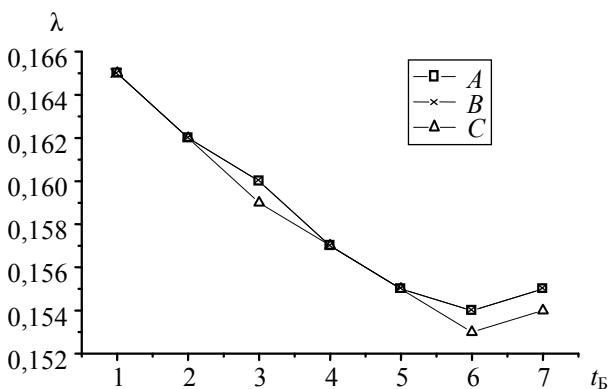


Рис. 10. График зависимости интенсивности отказов от стажа бригады, когда стаж 1-го работника при  $t_B = 1$  год составляет: A — 1 год; B — 3 года; C — 5 лет

На рис. 10 представлены графики зависимости интенсивности отказов от стажа бригады с учетом, что начальный стаж этого сотрудника составлял 1, 3 и 5 лет при  $t_B = 1$  год.

Рис. 10 показывает, что стаж молодого сотрудника практически не влияет на общую интенсивность отказов. Однако все же видно, что при меньшем начальном стаже 1-го печатника интенсивность отказов, возникающих в результате ошибок бригады, незначительно увеличивается.

В основе второго случая лежит изменение начального стажа 2-го работника. Он составлял 17, 20 и 23 года соответственно при стаже бригады, равном 1 год. Данный случай отражен на рис. 11.

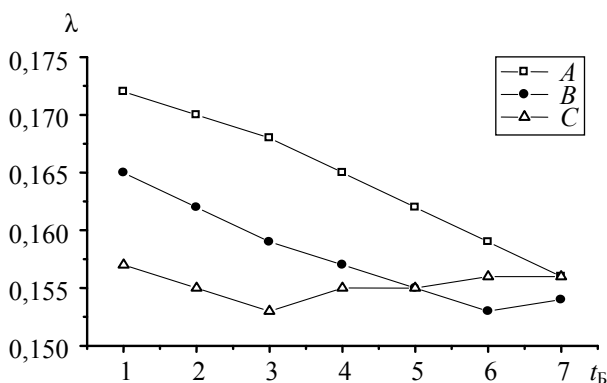


Рис. 11. График зависимости интенсивности отказов от стажа бригады, когда стаж 2-го работника при  $t_B = 1$  год составляет: A — 17 лет; B — 20 лет; C — 23 года

Как видно из рис. 11, 2-й печатник оказывает сильное влияние на интенсивность отказов. Можно предположить, что из-за этого сотрудника в определенный момент времени интенсивность отказов начинает возрастать. Объясняется данный факт тем, что именно этот работник достигает стажа  $T_K = 25$  лет, после которого может наблюдаться увеличение количества ошибок, допускаемых рабочим.

Так, например, кривая A характеризует постоянное снижение интенсивности отказов (стаж 2-го печатника изменяется в пределах от 17 до 23 лет), в то время как у кривых B и C интенсивность начинает возрастать, когда стаж работника достигает 25 лет: для кривой B — при  $t_B = 6$  лет, для кривой C — при  $t_B = 3$  года.

Третий случай отражает изменение начального стажа у наиболее опытного члена бригады. Его начальный стаж равен 33, 35 и 37 лет. Графики зависимости, характеризующие этот случай, показаны на рис. 12.

Как и в случае с самым молодым членом бригады, 3-й работник, наиболее опытный, не

оказывает существенного влияния на общую интенсивность отказов, так как уже преодолел рубеж, когда его стаж равнялся 25 годам. Тем не менее, при большем рабочем стаже 3-го печатника интенсивность отказов, которые возникают в результате ошибок бригады, немного выше.

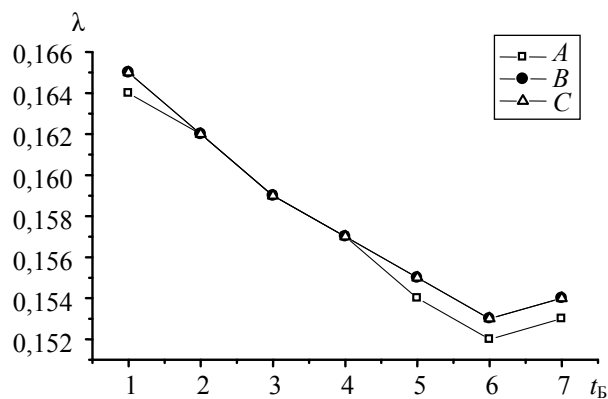


Рис. 12. График зависимости интенсивности отказов от стажа бригады, когда стаж 3-го работника при  $t_b = 1$  год составляет: A — 33 года; B — 35 лет; C — 37 лет

Таким образом, такой фактор, как возраст работника необходимо учитывать при построении обобщенной модели интенсивности отказов по причине ошибок персонала.

**Влияние квалификации и стажа работы сотрудников на интенсивность отказов.** Чтобы учесть влияние обоих факторов на интенсивность отказов, на основании первой модели, рассматривающей зависимость от квалификации сотрудников, выбираются три фиксированных значения интенсивности, которые соответствуют следующим разностям квалификационных коэффициентов  $\delta_k$ : 0,2, 0,5 и 0,8. Далее эти значения применяются для построения обобщенной модели интенсивности отказов по причине ошибок персонала с использованием формулы

$$\lambda(t) = \sqrt{\frac{\lambda_1^2(\delta_k) + \lambda_2^2(t)}{2}}, \quad (15)$$

где  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  — интенсивность отказов по 1-й и 2-й модели соответственно;  $t$  — стаж работника;  $\delta_k$  — фиксированное значение разности квалификационных коэффициентов.

Результат моделирования зависимости интенсивности отказов от квалификации и стажа сотрудника приведен на рис. 13.

Рис. 13 отражает вполне закономерные результаты построения обобщенной модели. Как видно, форма кривых соответствует второй модели, учитывающей стаж и возраст сотруд-

ников. Однако диапазон значений интенсивности для каждой кривой заметен уже по сравнению с исходной моделью. Логичен и тот факт, что при увеличении разности квалификационных коэффициентов график зависимости смещается вверх относительно оси ординат, что соответствует увеличению общей интенсивности отказов.

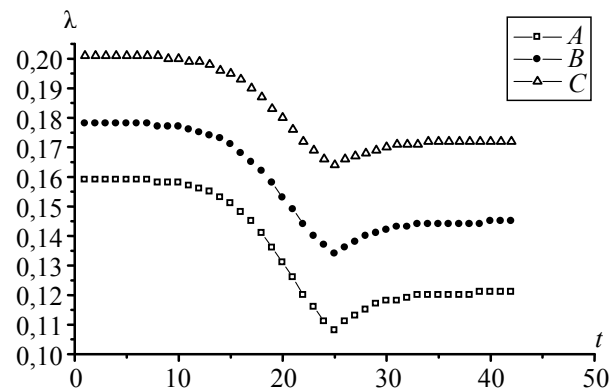


Рис. 13. График зависимости интенсивности отказов от квалификации и стажа сотрудника, когда разность квалификационных коэффициентов  $\delta_k$  составляет: A — 0,2; B — 0,5; C — 0,8

По аналогии можно построить графики зависимостей интенсивности отказов от стажа бригады и квалификации входящих в нее сотрудников. Корректировка формулы для учета квалификации производилась только для первых двух печатников, так как предполагается, что третий печатник уже достиг требуемого уровня квалификации. Результирующие графики зависимостей представлены на рис. 14.

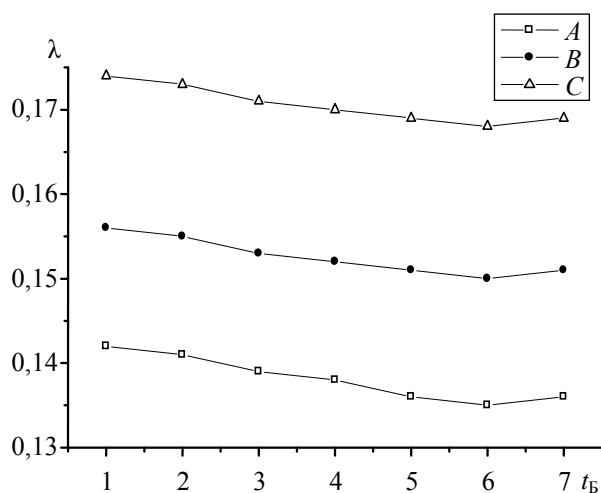


Рис. 14. График зависимости интенсивности отказов от стажа бригады и квалификации сотрудников, когда разность квалификационных коэффициентов  $\delta_k$  составляет: A — 0,2; B — 0,5; C — 0,8

Как и в предыдущем случае, видно, что кривые заметно сглаживаются в сравнении с исходной моделью, построенной для бригады рабочих, а общая интенсивность отказов возрастает с увеличением разности квалификационных коэффициентов рабочих.

Построена модель интенсивности отказов по причине ошибок персонала, которая позволяет оценивать вероятность появления отказа как из-за несоответствия работника требуемому уровню квалификации, так и в связи с увеличением его стажа и возраста, т. е. модель учитывает интеллектуальную и физическую составляющие кадрового потенциала. Также построена модель, которая отражает обслуживание печатного оборудования бригадой печатников, т. е. рассматриваются отказы, возникающие на стадии печати.

### Литература

1. Трусевич Н. Э., Мирончик Е. С., Барушко О. В. Статистическая имитационная модель логистики внутренних кадровых потоков полиграфического предприятия // Труды БГТУ. Сер. IX, Издат. дело и полиграфия. 2007. Вып. 15. С. 65–68.
2. Теоретическое исследование отказов печатного оборудования на стадии выведения из эксплуатации / Н. Э. Трусевич [и др.] // Труды БГТУ. 2013. № 8: Издат. дело и полиграфия. С. 39–42.
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.

*Поступила 28.03.2014*