# ГЛАВА 6. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ, ДОСТОВЕРНОСТИ И ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ, АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОТРЕБНОСТИ В РЕМОНТАХ АГРЕГАТОВ

## 6.1. ПОКАЗАТЕЛЬ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОГНОЗА

Эффективность прогнозирования [147] оценивается соотношением апостериорной и априорной дисперсий

$$Э = 1 - D^{ps} / D^{pr},$$

где $D^{ps}$, $D^{pr}$ - соответственно апостериорное и априорное значения дисперсий.

При очевидных достоинствах этого показателя он дает только общую оценку значимости прогноза. Широко используемое соотношение средних квадратических отклонений действенно для нормально распределенных величин при оценке точности прогноза, а также при сравнении возможных значений прогнозируемых величин для некоторых других законов, в частности, показательного и равномерной плотности.

Указанные способы оценок качества прогнозирования не являются универсальными и тем более конструктивными, позволяющими исчерпывающе охарактеризовать систему и выбрать пути ее совершенствования.

Основные параметры качества прогнозирования: точность, измеряемая величиной доверительного интервала для заданной вероятности осуществления прогноза и достоверность, характеризуемая вероятностью его осуществления для заданного доверительного интервала, имеют общий показатель. Он количественно оценивает изменение области возможных значений прогнозируемой величины по отношению к ранее разработанному прогнозу или действительным ее значениям и приемлем как для дискретных, так и для непрерывных величин.

Состояние машин, узлов, сопряжений, а также процесс его изменения зависит от большого числа случайных факторов, обуславливающих неопределенность, измеряемую энтропией. Для простой системы, определенной одной случайной величиной [2]

$$H(X) = -\sum_{i=1}^{n} P_i \log_2 P_i \,, \qquad (6.1)$$

где $P_i$ - вероятность состояния системы; $n$ - число возможных состояний.

Для сложной системы, состояние которой определяется несколькими случайными величинами

$$H(X_1, X_2, \mathbf{K}, X_S) = \sum_{K=1}^{S} H\left(X_K\right) \qquad (6.2)$$

где $H(X_K)$ - энтропия $к$-ой случайной величины; $S$ - число случайных величин, образующих систему.

Если факторы зависимы, энтропия сложной системы

$$\begin{aligned} H(X_1, X_2, \mathbf{K}, X_S) &= H(X_1) + H(X_2 / X_1) + \mathbf{K} + \\ &+ H(X_S / X_1, X_2, \mathbf{K}, X_{s-1}), \end{aligned} \qquad (6.3)$$

где $H(X_S/X_1,X_2,\ldots,X_{S-1})$ - энтропия величины $X_S$ при условии, что состояние остальных $S - 1$ случайных величин известно.

Энтропия дискретных величин всегда положительна и при известном законе распределения вычисляется по формуле (6.1).

Энтропия с непрерывным множеством состояний

$$H(X) = -\int_{-\infty}^{+\infty} f(x)\log_2 f(x)dx - \log_2 \Delta x, \qquad (6.4)$$

где $f(x)$ - дифференциальная функция распределения случайной величины, определяющая энтропию системы; Δx - точность измерения параметра.

Представив (6.4) в виде математического ожидания функции $f(x)$, получают формулу

$$H(X) = M\left[-\log_2\{f(x)\Delta x\}\right], \qquad (6.5)$$

Разность энтропий может служить количественной мерой повышения точности и достоверности прогноза, поскольку

$$\left|H^{pr}(X) - H^{ps(X)}\right| = I, \qquad (6.6)$$

где $H^{pr}(X)$, $H^{ps}(X)$ - априорная и апостериорная энтропии системы, характеризующей случайные значения исследуемого показателя; $I$ - количество выявленной при разработке прогноза информации о системе.

Степенью (сравнительной величиной) повышения точности и достоверности прогноза может служить показатель эффективности прогноза, выражаемый числом, для которого логарифм при основании 2 равен абсолютному значению разности априорной и апостериорной энтропий

$$Д = 2^{I}. \qquad (6.7)$$

В формуле (6.6) разность энтропий берется по абсолютному значению, так как энтропия системы с непрерывным множеством состояний может быть положительной, отрицательной и равной нулю [218].

Преимущества этого показателя очевидны. Его применение соответствует цели и задачам прогнозирования, так как он устанавливает связь между интервалом варьирования случайной величины, вероятностью, неопределенностью и полученной информацией. Чем больше получено информации о системе, тем меньше ее энтропия, поэтому у исследователя всегда есть количественная оценка известного и неизвестного.

## 6.2. ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ПРОГНОЗА ПРИ ПОСТЕПЕННЫХ ОТКАЗАХ

Вычисленная в соответствии с (6.5) энтропия системы, состояние которой распределено нормально [2] равна

$$H(t) = \log_2 \frac{\sigma\sqrt{2\pi e}}{\Delta t}. \qquad (6.8)$$

где σ - среднее квадратическое отклонение, *e* – основание системы натуральных логарифмов, *Dt* – допускаемая погрешность величины прогнозируемого параметра.

Разность энтропий при уточнении прогноза наработки изделия

$$I = \log_2 \frac{\sigma^{pr}\sqrt{2\pi e}}{\Delta t} - \log_2 \frac{\sigma^{ps}\sqrt{2\pi e}}{\Delta t} = \log_2 \frac{\sigma^{pr}}{\sigma^{ps}}. \qquad (6.9)$$

где $\sigma^{\mathrm{pr}}$, $\sigma^{\mathrm{ps}}$ – соответственно априорное и апостериорное среднее квадратическое отклонение прогнозируемой величины.

Интервал возможных значений нормально распределенной величины при заданной вероятности ***P***

$$L_p = \left(m(t) \pm t_p \sigma\right), \qquad (6.10)$$

где *m(t)* - математическое ожидание случайной величины; $t_p$ - квантиль нормального распределения.

Следовательно, в данном случае количество информации, содержащееся в прогнозной модели, может быть оценено разностью энтропий либо логарифмом отношения средних квадратических отклонений, либо логарифмом длин интервалов при заданной вероятности *P*.

$$I = \log_2 (L^{pr} / L^{ps}).$$

где $L_p^{pr}, L_p^{ps}$ - соответственно априорная и апостериорная величина интервала возможных значений объекта прогнозирования.

Показатель эффективности прогноза

$$Д = \sigma^{pr} / \sigma^{ps} = L^{pr} / L^{ps}.$$

Эти оценки могут быть найдены также, если известны вероятности, характеризующие достоверность прогноза. При постоянной величине доверительного интервала $L$=2ε [2]

$$t_p = \varepsilon / \sigma,$$

где ε - половина величины доверительного интервала.

Вероятность, характеризующая достоверность

$$P = \Phi(t_p / \sqrt{2}).$$

где Φ – символ функции Лапласа.

С учетом того, что $t_p = \sqrt{2}\Phi^{-1}(P)$, степень увеличения достоверности прогноза

$$Д = Ф^{-1}(P^{ps})/Ф^{-1}(P^{pr}),$$

где $Ф^{-1}$ – функция, обратная функции Лапласа.

Количество информации, содержащееся в прогнозной модели

$$I = \log_2(\Phi^{-1}(P^{ps}) / \Phi^{-1}(P^{pr})).$$

Реализация предложенной методики приведена в приложении 9 и в работе [308].

## 6.3.ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ПРОГНОЗА ПРИ ВНЕЗАПНЫХ ОТКАЗАХ

Поскольку дискретные случайные процессы с непрерывным временем описывают важнейшие явления в ремонтном производстве, рассматривается энтропия системы, определяемой случайной величиной, имеющей показательное распределение. В соответствии с (6.5)

$$\begin{aligned} H(t) &= M(-\log_2 \lambda e^{-\lambda t} \Delta t) = M(\lambda t \log_2 e - \log_2 \lambda - \log_2 \Delta t), \\ H(t) &= \lambda m(t) \log_2 e - \log_2 \lambda - \log_2 \Delta t = \log_2 \frac{e}{\lambda \Delta t}. \end{aligned} \tag{6.11}$$

Разность энтропий по абсолютному значению

$$\left| H^{pr}(t) - H^{ps}(t) \right| = \left| \log_2 \frac{e}{\lambda^{pr} \Delta t} - \log_2 \frac{e}{\lambda^{ps} \Delta t} \right| = \left| \log_2 \frac{\lambda^{ps}}{\lambda^{pr}} \right|. \tag{6.12}$$

Показатель эффективности прогноза

$$Д = 2^{\left| \log_2 \left( \lambda^{ps} / \lambda^{pr} \right) \right|}; \; Д = \begin{cases} \lambda^{ps} / \lambda^{pr} \;\; при \; \left( \lambda^{ps} / \lambda^{pr} \right) > 1; \\ 1 \; при \; \left( \lambda^{ps} / \lambda^{pr} \right) = 1; \\ \lambda^{pr} / \lambda^{ps} \;\; при \; 0 < \left( \lambda^{ps} / \lambda^{pr} \right) < 1. \end{cases}$$

При повышении точности и достоверности прогноза

$$Д = \lambda^{pr} / \lambda^{ps} \qquad (6.13)$$

Поскольку время безотказной работы при заданной вероятности $P$

$$e^{-\lambda t} = P,$$

то $-\lambda t = \ln P$ и. $\lambda = -\ln P / t$. Подставляя значение $\lambda$ в (6.12), находят

$$I = \left| \log_2 \frac{\ln P^{ps}}{t^{ps}} \cdot \frac{t^{pr}}{\ln P^{pr}} \right|.$$

Следовательно, если речь идет о точности $(P^{ps} = P^{pr})$, то

$$I = \left| \log_2 \frac{t^{pr}}{t^{ps}} \right|. \qquad (6.14)$$

Если прогноз оценивается достоверностью, то при $t^{pr} = t^{ps}$

$$I = \left| \log_2 \frac{\ln P^{ps}}{\ln P^{pr}} \right|. \qquad (6.15)$$

Подставляя значение $\lambda = -\ln P / t$ в (6.13), находят

$$Д = \frac{\ln P^{pr}}{t^{pr}} \cdot \frac{t^{ps}}{\ln P^{ps}}. \qquad (6.16)$$

При $P^{pr} = P^{ps}$, когда прогноз оценивается повышением точности

$$Д = \frac{t^{ps}}{t^{pr}}. \qquad (6.17)$$

При $t^{ps} = t^{pr}$, когда сравнительной величиной является достоверность

$$Д = \frac{\ln P^{pr}}{\ln P^{ps}} \cdot (6.18)$$

Реализация предложенной методики представлена в приложении 10 и в статье [308].

## 6.4. ПАРАМЕТРЫ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОГНОЗА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ, РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ПО ЗАКОНУ ВЕЙБУЛЛА

Энтропия случайной величины, распределенной по закону Вейбулла

$$H(x) = -\int_0^\infty \frac{m}{a} x^{m-1} e^{-(x/a)^m} \log_2\left(\frac{m}{a} x^{m-1} e^{-(x/a)^m}\right) dx - \log_2 \Delta x. \qquad (6.19)$$

Заменяя переменную $z = (x/a)^m$, получают

$$dz = d(x/a)^m = ma^{-m} x^{m-1} dx,$$

имея ввиду, что

$$x^m = za^m, \quad x = z^{1/m} a, \quad x^{m-1} = z^{(m-1)/m} a^{m-1};$$

находят

$$\log_2\left(\frac{m}{a} x^{m-1} e^{-(x/a)^m}\right) = \log_2\left(ma^{m-2} z^{(m-1)/m} e^{-z}\right),$$

$$(m/a) x^{m-1} e^{-(x/a)^m} dx = a^{m-1} e^{-z} dz.$$

Тогда интеграл в формуле (6.19) может быть представлен в виде суммы четырех интегралов

$$-\int_0^\infty a^{m-1} e^{-z} \left(\log_2 m + (m-2)\log_2 a + ((m-1)/m)\log_2 z\right) -$$

$$- z\log_2 e) dz = -(a^{m-1}\log_2 m \int_0^\infty e^{-z} dz + a^{m-1}(m-2)\log_2 a \int_0^\infty e^{-z} dz +$$

$$+ a^{m-1}((m-1)/m)\int_0^\infty e^{-z} \log_2 z dz - a^{m-1}\log_2 e \int_0^\infty z e^{-z} dz).$$

Все интегралы либо табличные, либо сводятся к ним [307]

$$\int_0^\infty e^{-z}dz = 1; \quad \int_0^\infty e^{-x}\log_2 zdz = (1/\ln 2); \quad \int_0^\infty e^{-z}\ln zdz =$$
$$= -(1/\ln 2)C; \quad \int_0^\infty ze^{-z}dz = 1.$$

$C$ = 0,5772 является приближенным значением постоянной Эйлера. Тогда

$$H(X) = -[a^{m-1}(\log_2 m + (m-2)\log_2 a - (m-1)C/m\ln 2 -$$
$$\log_2 e] - \log_2 \Delta x = -[a^{m-1}(\log_2 m + (m-2)\log_2 a -$$
$$-\left(\frac{m-1}{m}C+1\right)\log_2 e] - \log_2(\Delta x). \quad (6.20)$$

В частности, при $m$ = 1 $H(X) = \log_2(ae/\Delta x)$, что соответствует формуле (6.11) при $a = 1/\lambda$.

При $m$ = 2.

$$H(X) = -a(\log_2 m - (0{,}5C+1)\log_2 e) - \log_2 \Delta x;$$
$$H(X) = \log 1{,}81^a - \log_2 \Delta x = \log_2(1{,}81^a/\Delta x).$$

Разность энтропий двух распределений Вейбулла при $m_1$=$m_2$= 2 и $a_1 \neq a_2$

$$I = (a_1 - a_2)0{,}856.$$

Поскольку $m(x) = ab_m$, $\sigma = ac_m$, где $b_m = \Gamma(1+1/m)$;

$$c_m^2 = \Gamma(1+2/m) - b_m^2; \; b_m = 0{,}886; \; c_m = 0{,}46;$$

$$I = [m_1(x) - m_2(x)]0{,}966; \quad I = (\sigma_1 - \sigma_2)1{,}86.$$

Соответственно, $Д = 1{,}81^{a_1-a_2}$ или $Д = 1{,}95^{m_1(x)-m_2(x)}$, или $Д = 3{,}63^{\sigma_1-\sigma_2}$.

В случае $m_1{}^1m_2$, $a_1 \neq a_2$, показатели эффективности, точности и достоверности вычисляются по общим формулам (6.6), (6.7), (6.20).

Вопросы оценки качества прогнозирования изложены в статье [308].

## 6.5. ИСТОЧНИКИ ЭКОНОМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ПРОГНОЗНЫХ МОДЕЛЕЙ

Результатом прогноза является уменьшение энтропии системы, характеризующей число ее возможных состояний и их вероятности. Это, в свою очередь, снижает затраты труда, средств, материалов и времени при решении задач, обеспечивающих эффективное функционирование ремонтного производства.

1. Проектирование предприятий, осуществляющих капитальный ремонт машин, включающее оптимизацию программы, технологии, организации на всех этапах развития производства, обеспечивающую заданное качество ремонта.

2. Установление норм точности, разработка технических условий проведения технологических процессов.

3. Аттестация качества выпускаемых изделий и установление дифференцированной цены в зависимости от величин оценочно-нормативных показателей.

В комплексной системе управления качеством капитального ремонта совокупность методов прогнозирования, охватывающих все аспекты ремонта, является проблеморазрешающей системой благодаря дифференцированным ценам, стимулирующим повышение качества

ремонта и обеспечивающим получение средств для развития и совершенствования производства. В основе методики определения числа и границ категорий качества капитально отремонтированных изделий и надбавки к цене лежит прогноз (рис.6.1 и 6.2).Чем он точнее, тем больше надбавка и меньше потери по рекламациям [7]. Точные прогнозы существенно повышают эффективность КС УКР.

Возникающие из-за множества широко варьирующих неуправляемых и трудно контролируемых факторов неопределенности могут быть уменьшены при минимуме материальных затрат или даже без них, а только за счет эффективного прогноза. Следовательно, экономия, увеличивающаяся с увеличением информации, использованной при разработке прогноза, определяет цену одной двоичной единицы. В первом приближении

$Ц = (Ц^{pr} - Ц^{ps})/|H^{pr} - H^{ps}|$, (6.21)

где $Ц^{pr}$ - денежное выражение суммарных затрат труда, средств, материалов и времени априори; $Ц^{ps}$- то же при уточнении прогноза; $|H^{pr} - H^{ps}|$ - количество информации, использованное при уточнении прогноза.

В источниках [6,7,35,36,37] подробно освещены вопросы, связанные с решением конкретных задач определения экономического эффекта и снижения возможных потерь в ремонтном производстве.

## 6.6. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ РЕМОНТНЫХ КОМПЛЕКТОВ НА ПРИМЕРЕ ДВИГАТЕЛЯ ЯМЗ-24ОН

Автомобильный парк Норильского промышленного района рассредоточен по крупным специализированным предприятиям, имеющим достаточно оснащенные, специализирующиеся на номенклатуре автомобилей, обслуживающих основное производство, базы капитального ремонта. Единое руководство ремонтными и эксплуатационными службами, подчиненное одной цели: эффективному использованию транспорта, - стимулирует оптимальное планирование на основе прогнозирования состояния автомобилей и агрегатов. Учитывая, что эффективность прогнозирования наглядно и очевидно проявляется в случае краткосрочных и оперативных прогнозов, рассматривается методика формирования одной из составляющих программы ремонта.

Обеспечение работоспособности парка автомобилей предполагает подготовку ремонтных комплектов узлов, подлежащих замене при отказах таким образом, чтобы запасы не истощались и имел место минимум затрат на их производство или ремонт и хранение при наличии ограничений.

Методика основана на известных положениях теории вероятностей и динамического программирования [2,127], причем рекуррентное соотношение задачи управления запасами обобщено на множество состояний объекта исследования (6.22).

Методика рассматривается на примере двигателей ЯМЗ-240Н, установленных на автомобилях БелАЗ-75485, используемых на перевозке горной массы.

Работоспособность автомобилей поддерживается путем замены агрегатов, достигших предельного состояния, на капитально отремонтированные при проведении плановых текущих ремонтов. Вариация пробегов автомобилей, при которых осуществляется замена, а, следовательно, и требуемое количество резервных агрегатов, в частности, двигателей, обусловлена многочисленными факторами, определяющими качество ремонта, режимы нагружения, уровень проведения технических обслуживаний и ремонтов, условия движения перевозок и др.

Декадная потребность $d$ в капитально отремонтированных двигателях ЯМЗ-240Н предварительно по выборке небольшого объема, полученной в течение полугода, была охарактеризована эмпирическим распределением вероятностей $P(d_1)$, которое было принято в качестве прогнозной оценки потребности при стабильном прогнозном фоне.

Таблица 6.1

Распределение $\tilde{P}(d_1)$ декадной
потребности в двигателях ЯМЗ-240Н

| $d_1, шт.$ | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|
| $\tilde{P}$ | 0,05 | 0,80 | 0,10 | 0,05 |

Дальнейшие наблюдения в течение четырех лет при практически не меняющихся эксплуатационных условиях и условиях ремонта и технического обслуживания позволили получить более устойчивые оценки вероятностей декадной потребности, обусловивших распределение $\tilde{P}(d_2)$

Таблица 6.2

Распределение $\tilde{P}(d_2)$

| $d_2, шт$ | 3 | 4 |
|---|---|---|
| $\tilde{P}$ | 0,7 | 0,3 |

Причем энтропия системы, имеющей распределение $\tilde{P}(d_1)$ и являющейся априорной, существенно больше апостериорной энтропии системы, имеющей распределение вероятностей $\tilde{P}(d_2)$.

Стратегия пополнения резервов, обеспечивающих бесперебойную замену двигателей, рассчитывалось для первой и второй прогнозных моделей при ограничениях $0 \le z \le 4$; $0 \le x \le 5$ и минимальном значении числа резервных агрегатов на конец планового периода.

$$f_k(z) = \min\left[J_p(x) + J_c \sum_{j=1}^{s} p_j(z+x-d) + \sum_{j=1}^{s} p_j f_{k-1}(z+x-d)\right], (6.22)$$

где $f_k(z)$ -значение функции, отвечающее стратегии минимальных затрат на $k$ оставшихся отрезков (декад) планового периода (года) при уровне запасов $z$; $J_p(x)$ - сводный индекс затрат на ремонт $x$ двигателей; $J_c$ –сводный индекс затрат на хранение агрегатов; $p_i$ - вероятность потребности в $j$ агрегатах в течение декады; s – возможное число автомобилей, требующих замены двигателей в течение отрезка планового периода (декады) ; $z, x, d$ - соответственно, возможное значение числа резервных агрегатов на начало k-го отрезка планового периода, ремонтируемых двигателей и потребности в агрегатах в течение k-ой декады; $f_{k-1}(z+x-d)$ -значение функции, отвечающее стратегии минимальных затрат на k-1 оставшихся отрезках планового периода при фиксированных z, x, d.

Было найдено, что стоимость содержания запасов - линейная функция объема запасов

$$J_c(z) = 0{,}01z + 0{,}05;$$

значит,

$$J_c(0) = 0{,}05;\ J_c(1) = 0{,}06;\ J_c(2) = 0{,}07; J_c(3) = 0{,}08;\ J_c(4) = 0{,}09.$$

Индекс затрат на ремонт двигателей (стоимость ремонта, отнесенная к стоимости нового автомобиля)

$$J_p = 0{,}1x + 0{,}15 \text{ при } 3 > x \ge 1$$

$$J_p = 0{,}06x + 0{,}4 \text{ при } 5 \ge x \ge 3,$$

следовательно,

$J_p(1) = 0{,}25$; $J_p\ (2) = 0{,}35$; $J_p\ (3) = 0{,}58$; $J_p\ (4) = 0{,}64$; $J_p\ (5) = 0{,}70$.

В случае применения первой прогнозной модели для последней декады планового периода ($k=1$), как и для всех предыдущих имеет место 5 вариантов запаса двигателей на складе и 5 вариантов выпуска двигателей из ремонта.

Если на начало последней декады складские запасы отсутствуют, то значение функции $f_1(z)$ при полном удовлетворении потребности и минимальном количестве агрегатов, остающихся в резерве на конец планового периода, складывается из затрат на ремонт 5 двигателей и хранение 3 двигателей, что может быть при возникновении потребности в двух с вероятностью $p_2$ = 0,05, хранение 2 двигателей с вероятностью $p_3$=0,7, одного с вероятностью $p_4$=0,1, плюс затраты, связанные с хранением при отсутствии двигателей на складе, что может быть при возникновении потребности в 5 двигателях с вероятностью $p_5$=0,05.

$$f_1(0) = J_p(5) + J_c(3)p_2 + J_c(2)p_3 + J_c(1)p_4 + J_c(0)p_5, \qquad (6.23)$$

$$f_1(0) = 0.70 + 0.08 \cdot 0.05 + 0.70 \cdot 0.8 + 0.06 \cdot 0.1 + 0.05 \cdot 0.05 = 0.70 + 0.069 = 0.769\,.$$

Поскольку при $k$=1 с целью минимизации складских остатков $z$+$x$=5, то затраты на хранение остающихся после окончания планового периода двигателей будут одинаковы для всех вариантов, что следует из формул (6.22) и (6.23), и равны 0,069.Поэтому изменение всех значений $f_1(z)$ будет зависеть только от затрат на ремонт.

$$f_1(1) = J_p(4) + 0{,}069 = 0{,}64 + 0{,}069 = 0{,}709;$$

$f_1$ (2) = 0,58 + 0,069 = 0,649;

$f_1$ (3) = 0,35 + 0,069 =0,419;

$f_1$ (4)=0,25+0,069+0,319.

Варианты затрат последней декады представлены в табл.6.3

Таблица 6.3

Значения функции затрат последней декады

| $z$, шт. | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|---|
| $x$, шт. | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 |
| $f_1(z)$ | 0,769 | 0,709 | 0,649 | 0,419 | 0,319 |

Для предпоследнего отрезка планового периода ($k$=2) при $z$=4 могут быть 2 варианта выпуска изделий из ремонта $x$=1 и $x$=2, меньше нельзя, так как при возможной потребности $d$=2 на складе окажется более 4 двигателей, что противоречит ограничению $0 \le z \le 4$. Это имеет место при всех $z$ (табл.6.4) кроме $z$=0, при котором возможно только одно значение $x$=5 как удовлетворяющее спрос и не противоречащее ограничению $0 \le x \le 5$.

Таблица 6.4

Варианты затрат и оптимальная стратегия ремонта
на предпоследнем отрезке планового периода (k=2)

| Z, | $x$=1 | $x$=2 | $x$=3 | $x$=4 | $x$=5 | $x_2(z)$ | $f_2(z)$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | | | | | 1,419 | 5 | 1,419 |
| 1 | | | | 1,359 | 1,230 | 5 | 1,230 |
| 2 | | | 1,299 | 1,170 | | 4 | 1,170 |
| 3 | | 1,069 | 1,110 | | | 2 | 1,069 |
| 4 | 0,969 | 0,880 | | | | 2 | 0,880 |

При $z$ = 4, $x$ = 1 в соответствии с формулой (6.22)

$$f_2(4) = J_p(1) + J_c(3)p_2 + J_c(2)p_3 + J_c(1)p_4 + J_c(0)p_5 + f_1(3)p_2 + f_1(2)p_3 + f_1(1)p_4 + f_1(0)p_5 \,. \qquad (6.24)$$

Поскольку при $z + x = 5$ затраты на хранение постоянны и равны 0,069, а также в соответствии с формулой (6.24) постоянны при этом условии для $k$=2 и значения функции, отвечающее стратегии минимальных затрат на последнем отрезке планового периода ($k$=1)

$$f_1(3)p_2 + f_1(2)p_3 + f_1(1)p_4 + f_1(0)p_5 = 0{,}419\ 0{,}05 + 0{,}649\ 0{,}8 + 0{,}709\ 0{,}1 + 0{,}769\ 0{,}05 = 0{,}65,$$

то изменение всех значений $f_2(z)$ при $z + x = 5$ будет зависеть только от затрат на ремонт (табл. 6.4 )

$f_2(4)$ = 0,25 + 0,069 + 0,65 = 0,969;

$f_2(3)$ = 0,35 + 0,069 + 0,65 = 1,069;

$f_2(2)$ = 0,58 + 0,069 + 0,65 = 1,299;

$f_2(1)$ = 0,64 + 0,069 + 0,65 = 1,359;

$f_2(0)$ = 0,70 + 0,069 + ).65 +1,419.

При $z$ = 4, $x$ = 2 в соответствии с формулой (6.22)

$$f_2(4) = J_p(2) + J_c(4)p_2 + J_c(3)p_3 + J_c(2)p_4 + J_c(1)p_5 + f_1(4)p_2 + f_1(3)p_3 + f_1(2)p_4 + f_1(1)p_5 \,. \qquad (6.25)$$

В соответствии с (6.25) для $k$=2 при всех $z + x = 6$ затраты на хранение постоянны.

$$J_c(4)p_2 + J_c(3)p_3 + J_c(2)p_4 + J_c(1)p_5 = 0{,}09\ 0{,}05 + 0{,}08\ 0{,}8 + 0{,}07\ 0{,}1 + 0{,}06\ 0{,}05 = 0{,}079,$$

постоянны также значения функции, отвечающие стратегии минимальных затрат на последнем отрезке планового периода,

$$f_1(4)p_2 + f_1(3)p_3 + f_1(2)p_4 + f_1(1)p_5 = 0{,}319\ 0{,}05 + 0{,}419\ 0{,}8 + 0{,}649\ 0.1 + 0{,}709\ 0{,}05 = 0{,}451.$$

Поэтому для всех $f_2(z)$ при $z + x = 6$ на предпоследнем отрезке планового периода имеет место суммирование изменяющихся затрат на ремонт и постоянных затрат 0,079 и 0,451 (табл.6.4)

$f_2(4) = 0{,}35 + 0{,}079 + 0{,}451 = 0{,}880;$

$f_2(3) = 0{,}58 + 0{,}079 + 0{,}451 = 1{,}11;$

$f_2(2) = 0{,}64 + 0{,}079 + 0{,}451 = 1{,}17;$

$f_2(1) = 0{,}70 + 0{,}079 + 0{,}451 = 1{,}23.$

В предпоследнем столбце табл. 6.4 представлена оптимальная стратегия ремонта двигателей при изменяющемся резерве на начало предпоследней декады, в последнем столбце - значения функции затрат, отвечающее этой стратегии.

Продолжая вычисления по формуле (6.22), определяют для остальных отрезков планового периода значения $f_k(z)$ и $x_k(z)$, убеждаясь, что, начиная с $k = 4$ , стратегия становится стабильной и при $k$=6 характеризуется табл. 6.5.

Таблица 6.5

Значения функции оптимальных затрат при $k$=6

| $z$,шт. | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|---|
| $x$, шт. | 5 | 5 | 4 | 2 | 2 |
| $f_6$(z) | 3,73 | 3,58 | 3,52 | 3,38 | 3,23 |

В соответствии со второй прогнозной моделью $P(d_2)$ и рекуррентным соотношением (6.22) рассчитывают оптимальную стратегию и затраты для более точного и достоверного прогноза. В табл.6.6 представлены результаты расчета, из которых следует, что, начиная с $k$=5, стратегия становится стабильной.

Таблица 6.6

Варианты затрат и оптимальная стратегия ремонта для второй прогнозной модели ($k$=1…6)

| $Z$ | $k$=1 | | $k$=2 | | $k$=3 | | $k$=4 | | $k$=5 | | $k$=6 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $x_1$(z) | $f_1$(z) | $x_2$(z) | $f_2$(z) | $x_3$(z) | $f_3$(z) | $x_4$(z) | $f_4$(z) | $x_5$(z) | $f_5$(z) | $x_6$(z) | $f_6$(z) |
| 0 | 4 | 0,70 | 5 | 1,24 | 5 | 1,75 | 5 | 2,34 | 5 | 2,87 | 5 | 3,42 |
| 1 | 3 | 0,64 | 5 | 1,11 | 5 | 1,65 | 5 | 2,22 | 5 | 2,79 | 5 | 3,32 |
| 2 | 2 | 0,41 | 5 | 0,92 | 5 | 1,54 | 5 | 2,05 | 5 | 2,60 | 5 | 3,16 |
| 3 | 1 | 0,31 | 4 | 0,86 | 2 | 1,40 | 1 | 1,99 | 2 | 2,52 | 2 | 3,07 |
| 4 | 0 | 0,06 | 0 | 0,71 | 0 | 1,21 | 0 | 1,74 | 0 | 2,31 | 0 | 2,87 |

Используя равенство $$H(X) = -\sum_{i=1}^{n} p_i \log_2 p_i \,,$$

где $p_i$- вероятность $i$ -го состояния системы; $n$- число возможных состояний, находят априорную энтропию системы, заданную распределением $P(d_1)$

$H^{pr}(X)$=(0,05$log_2$0,05+0,8$log_2$0,8+0,1$log_2$0,1+0,05$log_2$0,05)=1,0219 дв.ед.

и апостериорную энтропию системы, заданную распределением $P(d_2)$

$$H^{ps}(X) = -(0{,}7log_2 0{,}7 + 0{,}3log_2 0{,}3)=0{,}8813 \text{ дв.ед.}$$

Следовательно, во второй модели информации больше на величину разности априорной и апостериорной энтропий

$$I = H^{pr}(X)-H^{ps}(X) = 1{,}0219 - 0{,}8813=0{,}1406 \text{ дв.ед.}$$

С другой стороны, как видно из сводки затрат, на реализацию стратегии, рассчитанной по первой прогнозной модели для $k$=6 (шести последних декад, или двух последних месяцев планового периода), и затрат на реализацию стратегии, вычисленной по второй прогнозной модели (данные последнего столбца табл.6.6), затраты на поддержание эксплуатационной надежности автомобилей снизились для всех вариантов наличия складских запасов на начало шестого от конца отрезка планового периода.

При $z$=0, например, имеет место 3,73-3,42=0,31;

при $z$=1 разность составит 3,58-3,32=0,26;

при $z$=2 значение разности 3,52 - 3,16 = 0,36;

при $z$=3 будет 3,38 - 3,07 = 0,31;

при $z$=4, снижение индексированных затрат составит 3,23-2,87=0,36.

Положив, что минимальная цена одной двоичной единицы представляет собой минимальную разность затрат на поддержание работоспособности автомобильного парка, отнесенную к разности априорной и апостериорной энтропий

$$Ц = 0,26/0,1406 = 1,85,$$

получим для рассматриваемого случая индексированную цену единицы информации.

Таким образом, благодаря более точному прогнозу, позволившему изменить стратегию поддержания работоспособности автомобилей, в течение двух месяцев за счет снижения объема незавершенного производства получена экономия, соответствующая цене одного капитально отремонтированного двигателя ЯМЗ - 240Н, при этом она достигнута без каких-либо материальных затрат.

# 6.7.ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ АВТОМОБИЛЕЙ

При построении прогнозных моделей широко используются накопленные знания об объектах прогнозирования, касающиеся структуры процессов их образования и развития, включая законы распределения, коэффициенты корреляции, регрессионные уравнения и др.

Огромный труд, вложенный исследователями в изучение объектов, выполняет функцию вспомогательной информации, служащей для ориентации при постановке задачи, планировании, проведении экспериментов и интерпретации результатов. Кроме того во многих случаях предварительно полученные результаты непосредственно вводятся в прогнозную модель, существенно сокращая затраты материалов, труда, денежных средств и времени на воспроизведение сложных и дорогостоящих экспериментов, и их эффективность может быть оценена количественно. Количество информации, полученное экспериментальным или расчетным путем

$$I = \left| H^{pr}(X) - H^{ps}(X) \right|, \qquad (6.26)$$

где $H^{pr}(X)$ - априорная энтропия системы (до эксперимента или до расчета по данным ранее выполненных исследований); $H^{ps}(X)$ - апостериорная энтропия (после эксперимента или после преобразования системы на основе известной информации о ней)

Сравнивая количество информации, полученное расчетным путем, с возможными затратами на проведение эксперимента при однородных значениях точности и достоверности прогноза, оценивают эффективность использования результатов исследований, выполненных ранее.

Ниже приводятся наиболее часто встречающиеся в ремонте и эксплуатации автомобилей случаи вычисления количественных оценок эффективности использования накопленных знаний и соответствующие расчетные формулы.

Информация, получаемая из того факта, что случайная величина Z является суммой (разностью) независимых случайных величин X и Y

$$I(Z) = H(X) + H(Y) - H(X \pm Y) = H(X,Y) - H(X \pm Y), \quad (6.27)$$

где $H(X), H(Y), H(X,Y), H(X \pm Y)$ - соответственно, энтропия случайных величин X,Y, их системы и суммы или разности.

При диагностировании, когда на показания прибора Z влияет величина измеряемого параметра X и ошибка Y, включающая погрешность прибора и действие других неучтенных факторов, имеют место равенства

$$Z = X + Y; \; D(X) + D(Y) = D(Z), \quad (6.28)$$

где $D(X), D(Y), D(Z)$ - дисперсии независимых случайных величин и их суммы соответственно.

Это же имеет место при расчете размерных цепей, когда величина замыкающего звена является суммой величин составляющих звеньев, при вычислении организационных показателей ремонтных предприятий и зон диагностирования автомобилей, когда число машин, остающихся необслуженными, равно разности характеристик входящего потока и потока обслуживания и во многих других случаях.

Вычисление энтропии осуществляется по формуле

$$H(X) = -\sum_{i=1}^{n} p_i \log_2 p_i, \quad (6.29)$$

где $p_i$ -вероятность $i$ -го состояния системы *X*; $n$ - число состояний.

Для случайных величин, распределенных нормально, энтропия вычисляется по формуле [2]

$$H(X) = \log_2 \sqrt{2peD(X)} / \Delta x, \qquad (6.30)$$

где $\Delta x$ - величина интервала в разрядах нормального закона, заданного в виде ряда распределения, или “участок нечувствительности” [2], характеризующий точность измерения величины *X*; *D(X)* - ее дисперсия.

Поэтому формула (6.27) с учетом (6.30) при условии $\Delta x \neq \Delta y \neq \Delta z$, поскольку исследуемые величины могут измеряться приборами с различной точностью, может быть записана следующим образом:

$$I(Z) = \log_2 \Delta z \sqrt{2peD(X)D(Y) / D(Z)} / \Delta x \Delta y. \quad (6.31)$$

Когда исследуемые величины коррелированы, мерой информации, которая может быть использована при построении прогнозной модели, служит полная взаимная информация. В формуле (6.28) *X* и *Y* независимы, но *X* и *Z, Y* и $Z$ коррелированы, причем корреляционные моменты в соответствии с формулой (4.19)

$$K(Z,X) = D(X); \;\; K(Z,Y) = D(Y).$$

Полная взаимная информация [2]

$$I_{z \leftrightarrow x} = H(X) - H(X / Z) = H(Z) - H(Z / X), \quad (6.32)$$

где *H(X/Z), H(Z/X)* - соответственно условные энтропии *X* и *Y*

Поскольку

$$D(Z / X) = D(Z)(1 - r^2(Z,X)), \qquad (6.33)$$

где $r(X,Z)$ - коэффициент корреляции, вычисляемый для данного случая по формуле

$$r(Z,X) = K(Z,X) / \sqrt{D(X)D(Z)} = \sqrt{D(X) / D(Z)}, \qquad (6.34)$$

с учетом формулы (6.28), из которой следует, что дисперсия *D(Y)* численно равна *D(Z) - D(X),* и поэтому

$$D(Z / X) = D(Z) - D(X) = D(Y). \qquad (6.35)$$

Откуда полная взаимная информация при $\Delta y \neq \Delta z$

$$I_{z \leftrightarrow x} = \log_2 \Delta y \sqrt{D(Z)} / \Delta z \sqrt{D(Y)}, \qquad (6.36)$$

или с учетом формул (6.30), (6.32), (6.33), (6.34), (6.35)

$$I_{z \leftrightarrow x} = \log_2 (\Delta z / \Delta y \sqrt{1 - r^2(Z,X)})$$

По определению [132] результатом процедуры прогнозирования является оценка для закона распределения прогнозируемой величины. Известно, что половина доверительного интервала, характеризующего устойчивость оценки математического ожидания при доверительной вероятности $b$ [2]

$$e = t_b \sqrt{\tilde{D} / n},$$

где $t_b$ -критическое значение *t* - статистики Стьюдента при доверительной вероятности $b$ и числе степеней свободы *k* = *n* - 1; $\tilde{D}$ - оценка дисперсии исследуемой величины; *n* -число наблюдений.

Если известны априорные значения $e$, то и апостериорные значения $e^{ps}$ могут быть вычислены в соответствии с процедурой, предусмотренной прогнозной моделью. Тогда число наблюдений, которое потребовалось бы для нахождения оценки математического ожидания с погрешностью $\pm e^{ps}$, вычисляется по формуле

$$n^{ps} = t_b^2 \tilde{D} / (e^{ps})^2. \qquad (6.39)$$

Аналогично могут быть определены значения $n^{ps}$, дающие требуемую точность оценок дисперсии и коэффициента корреляции.

В цехе ремонта двигателей АТО “ЦАТК” по выборке из комплектующих деталей (**$n$** = 60, приложение 11) найдены ряды распределения диаметров гильз цилиндров $P(X_г)$ двигателя ЯМЗ - 240 и диаметров юбок поршней $P(X_п)$, приведенные в первых четырех строках табл. 6.7

Таблица 6.7

Исходные данные и результаты расчета зазоров в сопряжении “гильза - юбка поршня” двигателя ЯМЗ - 240

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $X_г$,мм | 130,000… 130,005 | 130,005… 130,010 | 130,010… 130,015 | 130,015… 130,020 | | |
| $P^*(X_г)$ | 0,1 | 0,3 | 0,4 | 0,2 | | |
| $X_п$,мм | 129,800… 129,805 | 129,805… 129,810 | 129,810… 129,815 | | | |
| $P^*(X_п)$ | 0,3 | 0,5 | 0,2 | | | |
| $Z_о$,мм | 0,190 | 0,195 | 0,200 | 0,205 | 0,210 | 0,215 |
| $P^*(Z_о)$ | 0,02 | 0,11 | 0,26 | 0,33 | 0,22 | 0,06 |
| V, мм | - 0,01 | 0 | 0,01 | | | |
| $P^*(v)$ | 0,2 | 0,6 | 0,2 | | | |
| Z,мм | 0,300 | 0,305 | 0,310 | 0,315 | 0,320 | 0,325 |
| $P^*(Z)$ | 0,004 | 0,022 | 0,064 | 0,132 | 0,204 | 0,232 |
| Z,мм | 0,330 | 0,335 | 0,340 | 0,345 | | |
| $P^*(Z)$ | 0,184 | 0,102 | 0,044 | 0,012 | | |

Числовые характеристики распределений:

$$\tilde{m}(X_Г) = 139{,}011\ мм,\ \tilde{D}(X_Г) = 0{,}00002\ мм^2,\ \tilde{H}(X_Г) = 1{,}8465\ дв.ед.,$$

$$\tilde{m}(X_П) = 129{,}807\ мм,\ \tilde{D}(X_П) = 0{,}000012\ мм^2,\ \tilde{H}(X_П) = 1{,}4855\ дв.ед.$$

Зазор в сопряжении “гильза - юбка поршня” в процессе эксплуатации для фиксированных однородных условий, условий перевозок и других факторов работы в карьере изменяется в соответствии с регрессионным уравнением

$$\hat{z} = 0{,}008L + z_0 + V \text{ при } L \leq 15 \; тыс, км, \qquad (6.40)$$

где $L$ - пробег автомобиля, тыс.км; $z_0$ - начальный зазор в солряжении, мм; $V$ - случайная величина с математическим ожиданием равным нулю и дисперсией равной оценке дисперсии неадекватности $S^2(Z)$ уравнения регрессии (6.40).Распределение P(V) дано в 7,8 строках табл. 6.7, его параметры:

$$\tilde{m}(V) = 0, \; \tilde{D}(V) = S^2(Z) = 0{,}00004 \; мм^2, \; \tilde{H}(V) = 1{,}371 \; дв.ед.$$

Данное исследование проводилось с целью нахождения вероятных величин зазоров в сопряжении при сборке без предварительного подбора, вероятных значений величин зазоров после пробега 15 тыс.км, оценки эффективности использования для решения указанных задач результатов выборочных измерений начальных диаметров гильз $X_г$ и поршней $X_п$, а также уравнения регрессии (6.40), оценки информации о величине $Z$, содержащейся в информации о величине начального зазора $Z_0$.

Имея распределение $P(X_г)$ и $P(X_п)$, находят распределение $P(X_г, X_п)$, вычисляя оценки вероятностей по правилу умножения для независимых случайных величин. Вычитая $X_г$ - $X_п$, и суммируя оценки вероятностей для равных значений $Z_0 = X_г - X_п$, получают ряд распределения $P(Z_0)$, представленный в строках 5 и 6 табл.6.7. Его параметры:

$$\tilde{m}(Z_0) = 0{,}204 \; мм, \; \tilde{D}(Z_0) = 0{,}000032 \; мм^2, \; \tilde{H}(Z_0) = 2{,}2203 \; дв.ед.$$

Преобразуя $P(Z_0)$ с помощью неслучайной функции $z_1 = 0{,}008L + z_0$, суммируя полученное распределение *P(Z₁)* с *P(V)*, находят ряд распределения *P(Z)* (9,10,11,12 строки табл. 6.7), его параметры:

$\tilde{m}(Z) = 0{,}324$ *мм*, $\tilde{D}(Z) = 0{,}000072$ *мм*$^2$, $\tilde{H}(Z) = 2{,}8094$ *дв.ед.* Информация, получаемая в результате нахождения распределения *P(Z₀)* в соответствии с формулой (6.27)

$$I(Z_0) = \tilde{H}(X_Г) + \tilde{H}(X_П) - \tilde{H}(Z_0) = 1{,}8465 + 1{,}4855 - 2{,}2203 = 1{,}1117 \text{ дв.ед.}$$

Информация, получаемая при использовании уравнения регрессии (здесь $\tilde{H}(Z_0) = \tilde{H}(Z_1)$, так как вероятности рядов и число интервалов у них одинаково)

$$I(Z) = \tilde{H}(Z_1) + \tilde{H}(V) - \tilde{H}(Z) = 2{,}2203 + 1{,}371 + 2{,}8094 = 0{,}7819 \text{ дв.ед.}$$

Общая информация, полученная благодаря выполненным исследованиям и известной схеме формирования параметра $Z$ составляет:

$$I(Z_0) + I(Z) = 1{,}1117 + 0{,}7819 = 1{,}8936 \text{ дв.ед.}$$

При уровне значимости $a = 0{,}1$ и числе степеней свободы

$k = n - 1 = 60 - 1 = 59$ значение $t_b = 1{,}671$ [2], поэтому в соответствии с формулой (6.38) и правилом сложения погрешностей

$$e(Z_0) = e(X_Г) + e(X_П),$$

$$e(Z_0) = 1{,}671(\sqrt{0{,}00002/60} + \sqrt{0{,}000012/60}) = 0{,}002 \text{ мм.}$$

Тогда минимальное число наблюдений $n^{ps}$, которое бы потребовалось провести в механическом цехе с каждым из объектов для нахождения оценки $\tilde{m}(Z_0)$ не более, чем на величину $e(Z_0)$ при доверительной вероятности $b = 0{,}9$ отклоняющуюся от неизвестного математического ожидания, $n^{ps} = t_b^2 \tilde{D}(Z_0) / e^2(Z_0)$, в рассматриваемом случае

$$n^{ps} = 1{,}671^2 \cdot 0{,}000032 / 0{,}002^2 = 22 \text{ набл.}$$

Минимальный объем наблюдений в эксплуатации во много раз более трудоемких, чем в цехе, зависит от погрешности, вносимой эксплуатационными факторами и характеризуемой дисперсией $S^2(Z)$.

$$e(V) = 1{,}671\sqrt{0{,}00004 / 60} = 0{,}001\ мм.$$

Суммарная погрешность

$$e(Z) = e(Z_0) + e(V);\ e(Z) = 0{,}002 + 0{,}001 = 0{,}003\ мм.$$

Следовательно, минимальное число наблюдений в эксплуатации без учета потерь по техническим и организационным причинам, увеличивающим объем эксперимента более, чем в два раза, составит

$$n_1^{ps} = t_b^2 \tilde{D}(Z) / e^2(Z);\ n_1^{ps} = 1{,}671\sqrt{0{,}000072 / 0{,}003} = 22\ набл.$$

Полагая, что выборки, использованные для определения параметров распределений *P(Xг)* и *P(Xп)* принадлежат нормальной совокупности, количество информации, содержащееся в полученном результате прогнозирования величины $Z$ рассчитывается по формуле (6.31), которая при $\Delta Z_0 = \Delta Z$ может быть представлена как равенство $I(Z) = \log_2(1/\Delta V)\sqrt{2peD(Z_0)D(V)/D(Z)}$ или с учетом (6.33) и (6.35), подставив вместо *D(V)* ее значение

$$D(V) = D(Z) - D(Z_0) = D(Z / Z_0) = D(Z)(1 - r^2(Z_0, Z)),$$

может быть получена формула

$$I(Z) = \log_2(1/\Delta V)\sqrt{2peD(Z_0)(1 - r^2(Z_0, Z)}.$$

Оценка коэффициента корреляции в соответствии с (6.34) в данном случае составит

$$\tilde{r}(Z_0, Z) = \sqrt{\tilde{D}(Z_0) / \tilde{D}(Z)};\ \tilde{r}(Z_0, Z) = \sqrt{0{,}000032 / 0{,}000072} = 0{,}667.$$

Поэтому при $\Delta V = 0{,}01$мм

$I(Z) = \log_2(1/0{,}01)\sqrt{2pe \cdot 0{,}000032(1-0{,}667^2)} = 0{,}8$ *дв.ед.* Информация, использованная при вычислении начального зазора $Z_0$ при $\Delta X_Г = \Delta X_П = \Delta Z_0 = 0{,}005$ *мм*

$$I(Z_0) = \log_2(1/\Delta X)\sqrt{2peD(X_Г)D(X_П)/D(Z_0)},$$

$$I(Z_0) = (1/0{,}005)\sqrt{2pe \cdot 0{,}00002 \cdot 0{,}000012/0{,}000032} = 1{,}178 \text{ дв.ед.}$$

Общая информация $I(Z_0) + I(Z) = 1{,}198 + 0{,}8 = 1{,}978$ *дв.ед.*

Разница в результатах вычислений по формулам (6.26), (6.27), (6.29) и (6.31), (6.33), (6.35), равная 0,085 вызвана отклонениями эмпирических распределений $P(X_г)$ и $P(X_п)$ от нормального закона.

Полная взаимная информация в соответствии с формулами (6.36) и (6.37)

$$I_{z_0 \leftrightarrow z} = \log_2(\Delta V / \Delta Z\sqrt{1 - r^2(Z_0, Z)}),$$

$$I_{z_0 \leftrightarrow z} = \log_2(0{,}01/0{,}005\sqrt{1-0{,}667^2}) = 1{,}425 \text{ дв.ед.}$$

Следовательно, в процессе прогнозирования использовано 0,8 дв.ед. информации, что составляет существенную часть от количества информации, которое содержит  о величине *Z*.Более совершенная прогнозная модель позволила бы использовать большее количество информации, предельным значением которой является

$$I_{z_0 \leftrightarrow z} = 1{,}425 \text{ дв.ед.}$$

Таким образом, приведенные расчетные формулы позволяют вычислять количество использованной в прогнозной модели предварительной информации и оценивать ее вклад в разрабатываемые методики. Сравнение количества использованной информации, содержащейся в прогнозной модели, и совокупности трудовых и материальных затрат для проведения экспериментов открывают возможность объективно оценивать эффективность применения данных ранее выполненных исследований. Наличие количественной оценки, получаемой благодаря вычислению полной взаимной информации, позволяет оценивать качество прогнозной модели с позиций полноты учета влияния на объект как технологических, так и эксплуатационных факторов.

## 6.8. АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДОВ ПОДСИСТЕМЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ В АВТОТРАНСПОРТНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Этапы прогнозирования, содержание которых дано в источнике [132], являются общим алгоритмом разработки прогноза, предполагающим выполнение большого объема творческой работы, не поддающейся формализации. Еще больший объем творческого труда вкладывается при разработке системного прогноза повышения качества капитального ремонта.

Чем больше период упреждения и чем меньше информации об объекте, тем больше роль эвристических и экспертных методов. Это проявляется при внедрении новых, ранее не применявшихся в ремонте технологических процессов или методов организации производства, когда нет ясной картины о значимости и взаимодействии факторов.

Неопределенность апостериорных значений прогнозируемых величин, а вместе с этим и значимость творчества, снижается при уменьшении периода упреждения и при увеличении количества информации о проектируемых технологических процессах или организационных формах.

Разработка краткосрочных и оперативных прогнозов может быть почти полностью алгоритмизирована. Для прогнозирования технико-экономических показателей предприятия и его участков: загрузки, производительности, длины очереди, количества оборудования, приспособлений и инструмента, числа рабочих мест и др. - могут быть скомпонованы достаточно несложные машинные программы на основе широко используемых блоков, позволяющих вести статистическую обработку информационного массива. К ним относятся программы нахождения числовых характеристик случайных величин, проверки гипотез, сглаживания экспериментальных зависимостей методом наименьших квадратов, дисперсионного анализа и др.

Пакеты программ службы ремонтного предприятия, занимающейся прогнозированием, должны содержать известные типовые алгоритмы и программы планирования эксперимента, обработки данных наблюдений и построения многофакторных моделей, используемых для оптимизации параметров технологических процессов, расчета размерных цепей, разработки технических условий на ремонт, оценки эксплуатационных показателей отремонтированных изделий, прогнозирования остаточного ресурса и т.п. [28,163,168].

Алгоритмы выбора метода прогнозирования на основе критериев, представленных в главе 2, определения порядка прогнозных моделей, а также сформулированные положения и правила формирования прогнозов и приведенные в приложении 12 программные средства, имеющиеся на предприятии, являются базой, позволяющей разрабатывать достаточно достоверные и точные прогнозы [309,310,311].

## 6.8. ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ

1. Состояние автомобилей, узлов, сопряжений, а также процесс его изменения зависит от большого числа случайных факторов, обуславливающих неопределенность, измеряемую энтропией. Разность априорной и апостериорной энтропий является количественной мерой повышения точности и достоверности прогноза. Применение этого показателя соответствует целям и задачам прогнозирования, так как он устанавливает связь между интервалом варьирования прогнозируемой величины, доверительной вероятностью, неопределенностью системы и информацией, содержащейся в модели, благодаря чему у исследователя всегда есть оценка известного и неизвестного, стимулирующая дальнейший поиск. Для оценки степени (сравнительной величины) повышения точности и достоверности прогноза установлен показатель эффективности прогноза, выражаемый числом, для которого логарифм при основании 2 равен абсолютному значению разности априорной и апостериорной энтропий.

2. Для широко используемых предельных распределений прогнозируемых величин, в частности, нормального и показательного, вычисление точности, достоверности прогнозной модели, а также степени увеличения апостериорных значений этих параметров по сравнению с априорными осуществляется по простым, взаимно связанным соотношениям, что дает возможность оценивать параметры прогнозов постепенных и внезапных отказов. При этом знание одного параметра позволяет найти все остальные, включая апостериорную энтропию и количество информации, реализованное прогнозной моделью, обосновывающей внедряемое организационно-техническое мероприятие.

3. Полученная для закона Вейбулла формула энтропии позволяет вычислять параметры прогноза, используя оценки числовых характеристик апостериорного распределения. Для некоторых частных значений коэффициента вариации соотношения для нахождения оценок точности и достоверности прогнозной модели существенно упрощаются.

4. Источником экономической эффективности, обеспечивающим получение средств для развития и совершенствования производства является цена капитально отремонтированного изделия, дифференцированная в соответствии с качеством ремонта. Она устанавливается при заводской аттестации качества на основе прогноза наработки изделия до предельного состояния. Надбавка к цене изделия тем выше, чем точнее прогноз и, естественно, меньше потери от рекламаций.

5. Уменьшение затрат при проектировании ремонтных предприятий, технологических процессов ремонта, установлении норм точности, разработке технических условий благодаря максимально точным и достоверным прогнозам позволяет снизить себестоимость ремонта без каких-либо капитальных затрат, что дает возможность оценить в денежном выражении количество информации, реализуемой при использовании прогнозной модели.

6.Наглядные и очевидные преимущества более точного и достоверного прогноза, проявляемые при краткосрочном и оперативном прогнозировании, позволяют существенно снизить материальные затраты при формировании ремонтных комплектов, рассчитываемых с использованием моделей динамического программирования. Вместе с достижением экономического эффекта посредством прогнозирования обеспечивается планомерная загрузка ремонтного предприятия. Благодаря более точному прогнозу, позволившему изменить стратегию поддержания работоспособности автомобилей БелАЗ в АТО “ЦАТК”, упорядочив организацию ремонта двигателей ЯМЗ-240Н, за счет снижения объема незавершенного производства получена годовая экономия в размере 600 тыс. рублей (в ценах мая 1998 г.)

7.Применение численных методов позволяет количественно оценить значимость и эффективность результатов ранее выполненных исследований, использованных при формировании прогнозных моделей, снижая затраты средств, труда и времени при разработке прогнозов на 15…20 процентов.

8.В совокупности с типовыми машинными программами обработки статистических данных предложенные методики и алгоритмы дают возможность разрабатывать эффективные модели прогнозирования эксплуатационных показателей автомобилей, используемых в северном регионе.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1.Предложенная классификация методов и объектов прогнозирования потребности в ремонтах агрегатов и автомобилей базируется на фундаментальных законах теории вероятностей. Выбор метода осуществляется с помощью критериев, согласующих доверительную вероятность, доверительный интервал, количество и качество информации. Классификация последовательная, с единым признаком, исключающим пересечение классов, охватывает все объекты ремонта, проста и алгоритмизируема. Принципиальная последовательность выбора метода прогнозирования предполагает отнесение исследуемого объекта к одному из классов в соответствии с имеющейся о нем информацией .

Подсистема прогнозирования показателей работоспособности автомобилей представляет цепь взаимосвязанных прогнозов, в которой результаты предшествующего поискового прогноза являются нормативными показателями для разработки поискового прогноза возможных состояний подсистемы следующего уровня. Последовательность разработки конкретного прогноза включает несколько этапов, содержанием которых является цепь взаимно связанных действий от анализа проблемы и выявления объекта до верификации, формирования системного прогноза и составления инструкции для потребителя.

2.Предлагаемый способ определения потребности в ремонтах агрегатов и автомобилей с целью поддержания их работоспособности базируется на численных методах, позволяющих учитывать любое число факторов, влияние которых на объект может быть оценено с помощью известных закономерностей либо методами экспериментальных исследований. Это повышает эффективность прогнозирования, так как охват моделью максимального количества информации повышает точность и достоверность оценок. Ошибки прогнозов, разрабатываемых на основе устойчивости средних значений и относительных частот, не выходят за пределы 15%.

3.Несмотря на существенное рассеивание календарного пробега, среднее число автомобилей, формирующих годовую программу предприятия , практически утрачивает характер случайности и с приемлемой точностью может служить не только исходной величиной при проектировании новых и реконструкции действующих, но при расчетах текущей загрузки предприятия. Интенсивность изнашивания деталей, сопряжений и узлов автомобилей при многократном воспроизведении условий перевозок может быть охарактеризована средним значением. При изменяющихся условиях оценивается устойчивость относительных частот вариантов нагружений и в случае их стабильности для каждого варианта разрабатывается прогноз на основе устойчивости условных средних значений. Оптимизация программ ремонта агрегатов и автомобилей с использованием прогнозных оценок на предприятиях АО Норильский никель позволила снизить простой в ремонтах автомобилей КрАЗ - 6510 в среднем до 20 дней вместо 22, КамАЗ-5511 - до 18 вместо 21.

4.Способ поддержания работоспособности автомобилей на основе ненагруженного резервирования предусматривающего замену отказавших элементов на заранее подготовленные ремонтные комплекты, позволяет, используя штатную информацию инженерно-технических служб автотранспортных предприятий, находить число и номенклатуру комплектов, базируясь на методе устойчивых средних значений и объективных статистических критериях. Оптимизация номенклатуры и количества запасных частей для двигателя КамАЗ -740 и автомобилей семейства КамАЗ дала возможность в тресте механизации и благоустройства ПО Норильскбыт при незначительном увеличении затрат на запчасти и подготовку ремонтных комплектов уменьшить в среднем на 2 дня простои в плановых и аварийных ремонтах при снижении трудоемкости ремонта на 10%.

5.Предложенная классификация динамических моделей позволяет на основе статистических критериев оценивать экспериментальные зависимости с позиций устойчивости средних значений отклика в точках эксперимента, допустимой погрешности, величины коэффициента корреляции и адекватности экспериментальным данным. Методики анализа конечных и разделенных разностей средних значений отклика в точках эксперимента дает возможность найти порядок параболы для однофакторной и порядок и вид для многофакторной зависимости, опираясь на характер воздействия факторов и точность опытов. Устойчивость относительных частот вероятностных характеристик системы “водитель - автомобиль - дорога - среда” создает условия прогнозирования эксплуатационных показателей изделий после ремонта с помощью теории марковских процессов, когда им присущи свойства стационарности, ординарности и отсутствия последействия.

6.Классификация моделей прогнозирования, базирующихся на предельных законах, позволяет на основе единства признака использовать их в сочетании с моделями устойчивых средних значений и относительных частот. Это дает возможность решать технологические и организационные задачи, охватывающие многочисленные процессы ремонта. Благодаря устойчивости и безграничной делимости широко применяемых в эксплуатации и ремонте законов распределения осуществляется дифференциация технологического процесса сборки и формирование комплексов работ на постах, расчет временных цепей и др. Рациональная организация, планировка и оснащение рабочих мест, выполненные на основе прогнозных оценок времени выполнения комплексов работ на постах ремонтного участка Горно-транспортного предприятия, позволили снизить трудоемкость ремонта двигателей ЯМЗ-236 со 186 до 172 чел.-ч, и ЯМЗ-238 - со 198 до 186 чел.-ч.

7.Предельные законы позволяют разрабатывать простые модели прогнозирования внезапных отказов, возникающих по причине отклонений от технических условий проведения технологических процессов, и вносить коррективы в документацию, организацию производства и оснащенность рабочих мест. На базе прогнозных оценок в Горно-транспортном предприятии и в Управлении автомобильных дорог и снегоборьбы организован оптимальный резервный фонд агрегатов для замен в случаях внезапных отказов, позволивший снизить продолжительность простоя автомобилей во внеплановых ремонтах на 10%.

8.Реализация запаса точности механизмов, представляемая в виде случайной функции, дает возможность на основе устойчивости распределений ошибок механизмов и наработок изделий прогнозировать наряду с другими показателями минимальную гарантированную с заданным уровнем доверительной вероятности наработку до отказа. Безграничная делимость предельных законов позволяет осуществлять каноническое разложение случайных функций наработок изделий с целью уменьшения апостериорной дисперсии прогноза за счет использования дополнительной информации об особенностях ремонта или эксплуатации. Аттестация качества капитально отремонтированных изделий на основе прогноза предполагает установление дифференцированной цены в соответствии с гарантируемой наработкой, что является источником укрепления экономики предприятия, развития и совершенствования технологии и организации ремонта.

Принятая к внедрению в марте 1973 г. На заводе АРЕМЗ-1 Главмосавтотранса методика вкупе с комплексом организационно-технических мероприятий позволила получить годовой экономический эффект в размере 83,9 тыс. рублей (в ценах 1974 г.) и увеличить гарантийную наработку коробок передач автомобиля ЗИЛ-130 после ремонта до 40 тыс. км.

9.Представленные теоремы о числовых характеристиках являются действенным средством полного и непосредственного использования ранее выполненных исследований в виде эмпирических формул, распределений или их параметров при разработке прогнозных моделей.

10.Простые и удобные для составления машинных программ правила нахождения законов распределения функций случайных аргументов позволяют при построении прогнозных моделей непосредственно использовать ранее полученные регрессионные уравнения и случайные функции, максимально используя накопленные знания об объектах прогнозирования.

На их основе разработан способ прогнозирования организационных показателей ремонтных предприятий, как систем массового обслуживания, функционирующих в нестационарном режиме и способ вычисления параметров поточной сборки автомобилей БелАЗ - 75485.

Формирование годовой производственной программы в АТО “ЦАТК” с помощью прогнозных оценок потребности в ремонтах агрегатов автомобиля БелАЗ-75485 и расчет оптимальной продолжительности сборки на линии привели к сокращению времени пребывания автомобиля в ремонте с 26 до 24 дней.

11.Методика экстраполяции реализаций нестационарного случайного процесса изменения ошибки механизма в соответствии с критерием минимального среднего квадратического отклонения значений найденной функции в узлах экстраполяции от априорных и апостериорных значений, полученных в результате наблюдений и прогноза, базируется на прогнозах воздействия факторов на отклик, их взаимной связи и значимости с учетом реально возможных вариаций процесса, снижая ошибку прогноза в среднем на 20%.

12.На основе свойств конечных и разделенных разностей сформулированы последовательности анализа данных наблюдений с целью определения порядка и вида одно и многофакторных зависимостей, а также для часто применяемых моделей получены простейшие соотношения для вычисления коэффициентов регрессии, позволяющие на 10 % сократить объем вычислительных работ.

13.Использование величины абсолютной разности априорной и апостериорной энтропий в качестве меры повышения точности и достоверности прогнозов соответствует целям и задачам прогнозирования. Она устанавливает связь между интервалом варьирования прогнозируемой величины, доверительной вероятностью, неопределенностью системы и информацией, содержащейся в прогнозной модели, благодаря чему у исследователя всегда есть оценка известного и неизвестного, стимулирующего поиск. Для часто используемых предельных законов количественная оценка повышения точности и достоверности прогнозных моделей, а также степень увеличения этих параметров по сравнению с априорными осуществляется с помощью простых соотношений.

На базе разработанных показателей предложен способ количественной оценки информации, полученной в результате ранее выполненных исследований и использованной при построении прогнозных моделей, ее значимости и эффективности, а также способ оценки значимости информации, полученной экспертным методом.

Трудоемкость и продолжительность формирования прогнозных моделей благодаря использованию ранее выполненных исследований может быть уменьшена на 15...20 процентов.

14.Наглядные и очевидные преимущества более точного и достоверного прогноза, проявляемые при краткосрочном и оперативном прогнозировании, позволяют существенно снизить затраты при формировании резервов. Вместе с достижением экономии обеспечивается планомерная загрузка ремонтного предприятия.

Благодаря более точному прогнозу, позволившему изменить стратегию поддержания работоспособности автомобилей БелАЗ -75485 в АТО “ЦАТК”, упорядочив организацию ремонта двигателей ЯМЗ-240Н, за счет снижения объема незавершенного производства получена годовая экономия в размере 600 тыс. рублей (в ценах мая 1998 г.).

15.Минимизация возможных потерь при проектировании ремонтных предприятий, технологических процессов ремонта, установлении норм точности, разработке технических условий благодаря точным и достоверным прогнозам дает возможность оценить в денежном выражении количество информации, содержащееся в прогнозной модели. Использование предложенных методик в деятельности ремонтных служб Норильского региона позволяет на 7...10 процентов снизить затраты на ремонт автомобилей и агрегатов.