

ГЛАВА 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОПЫТНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ПРОВЕРКА МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОТРЕБНОСТИ В РЕМОНТАХ АГРЕГАТОВ И АВТОМОБИЛЕЙ

5.1 ФАКТОРЫ, ОБУСЛАВЛИВАЮЩИЕ СТРЕМИТЕЛЬНОЕ ИСЧЕРПАНИЕ РЕСУРСА АВТОМОБИЛЕЙ, ЭКСПЛУАТИРУЮЩИХСЯ НА СЕВЕРЕ

Дорожные условия, существенно влияющие на режимы нагружения всех систем и элементов автомобиля, в Норильском промышленном районе характеризуются преимущественно четвертой (40%) и пятой (40%) категориями эксплуатации, в меньшей мере - третьей (10%), второй (8%) и первой (2%).

Общая протяженность дорог, по которым осуществляются перевозки более 90% пассажиров и технологических грузов составляет около шестисот километров. Покрытие: асфальт, щебень, грунт, улучшенный местными материалами (шлаком), естественные грунтовые и внутрикарьерные дороги, - и рельеф местности (равнинный, слабохолмистый и холмистый) формально соответствуют третьей и второй категориям эксплуатации, и это действительно имеет место в течение короткого летнего промежутка, причем сразу после ремонта покрытия. До ремонта летом и в течение остальных трех четвертей года дороги представляют собой зимники не очень высокого качества, перемежающиеся с бездорожьем из-за многочисленных криогенных процессов: пучинообразования и деформаций из-за сплывов, сползаний, пластического течения и др., - а также термокарстовых явлений: образования углублений, воронок, провалов.

Большая вариация дорожных условий и их нестабильность несмотря на постоянно проводимые работы по капитальному ремонту и текущему содержанию дорог мощными специализированными предприятиями затрудняют

использование нормативных коэффициентов при планировании и выполнении организационно-технических мероприятий по поддержанию эксплуатационной надежности автомобильного транспорта региона.

Условия движения менее изменчивы, но не менее разнообразны и неблагоприятны. Эксплуатация автомобилей, занятых на перевозках технологических грузов в карьерах, затруднена многочисленными сверхнормативными подъемами и спусками (уклоны сто пятьдесят тысячных и более) при наличии помех в виде постоянно работающей на линии дорожной техники, а также туманами и метелями. Кроме того специфика устройства карьеров вызывает необходимость выполнения большого числа маневровых операций, к тому же трасса, как правило, изобилует резкими изменениями продольного профиля на небольшой длине и малыми радиусами поворотов.

Технологические перевозки, не связанные с транспортировкой руды, осуществляются как в городе и в пригородной зоне, так и за её пределами, но большая часть помех, провоцирующих частое переключение передач и большое число торможений, здесь также имеет место.

Работа пассажирского автотранспорта, функционирующего большей частью на наиболее оживленных магистралях, отличается повышенной интенсивностью движения, обусловленной тем, что на 9000 автомобилей Норильского горно-металлургического комбината приходится 19000 частных автомобилей.

Условия перевозок стабильны и не имеют существенных отличий от соответствующих показателей других регионов.

Природно-климатические условия, охватывающие влияние температуры воздуха, её колебания, скорость ветра, влажность, число дней с туманом и метелью на надежность автомобилей имеют точечную оценку, по шкале П. И.

Коха соответствующую наиболее жесткому климату. Формула для вычисления технической жесткости климата в баллах имеет вид [207]

$$N_k = (0,75t_{\text{mincp}} + 0,25t_{\text{minabc}}) \cdot (1 + 0,015s_x)(1 + 0,07v_x)(1 + 0,26f_x)(1 + 0,014n_{TM})(1 + 0,022\tau_x)$$

где t_{mincp} - среднее значение средних минимальных температур воздуха за три наиболее холодных месяца, °С; t_{minabc} - среднее значение абсолютного минимума температуры воздуха за три наиболее холодных месяца, °С; s_x - средняя непериодическая амплитуда суточных колебаний температуры воздуха за три наиболее холодных месяца, °С; v_x - средняя скорость ветра за три наиболее холодных месяца, м/с; j_x - среднее значение относительной влажности воздуха за три наиболее холодных месяца в долях единицы; n_{TM} - среднее значение за месяц числа дней с туманом и метелью за три наиболее холодных месяца; τ_x - продолжительность действия (в месяцах) средней температуры воздуха ниже нуля.

Техническая жесткость климата Норильского промышленного района составляет более 121 балла. Отрицательное влияние факторов жесткости на надежность технических устройств и, в частности, автомобилей широко представлено в литературе [12, 186].

Среднегодовые параметры (рис. 5.1, 5.2) природно-климатических условий в регионе практически не изменяются в течение многих лет [208], как не изменяется и агрессивность окружающей среды из-за постоянной сверхнормативной концентрации окислов серы, отрицательно влияющей на надежность системы "водитель - автомобиль - дорога - среда". По данным экологической службы комбината среднегодовой выброс диоксида серы составляет более двух миллионов тонн, выброс окислов тяжелых металлов, включая окислы кобальта, никеля и меди, превышает тридцать тысяч тонн. Даже в самые благоприятные периоды предельно допустимая концентрация ядовитых

газов и взвешенных частиц превышает в пять раз, (при максимальном превышении, достигающем двадцать шесть предельно допустимых норм) [209].

Интенсивность возмущения магнитного поля, вызывающая частые магнитные бури, достигает 0,05 эрг, что в пять раз превышает соответствующий показатель для магнитных бурь в средних широтах.

Стабильная среднегодовая температура сочетается с большим разбросом среднемесячных температур, достигающим 90°C, а также перепадами температур в течение месяца, сильные морозы (-30...-40)°C - с густым туманом при видимости до 20м, резкие повышения температуры до (-10...-15)°C - со снегопадами и метелями. Средняя скорость ветра составляет 15 - 20 м/с при максимуме 47 м/с, толщина снежного покрова с учетом снегопереноса достигал 350 см, относительная влажность колеблется в пределах 68 ... 85 %.

Полярная ночь, длящаяся 75 суток, совместно с неблагоприятными периодами до и после неё, продолжающимися 3 месяца, оказывают угнетающее действие на организм человека и существенно снижают его работоспособность [207,208].

В регионе эксплуатируются автомобили практически всех отечественных моделей, включая ближнее зарубежье. На 1998 год количество автомобилей, осуществляющих пассажирские и грузовые перевозки, по маркам составляет: КамАЗ - 907 ед., МАЗ - 1228 ед., Урал - 556 ед., Краз - 598 ед., ЗИЛ - 1154 ед., ГАЗ - 444 ед., УАЗ - 1273 ед., БелАЗ - 120 ед., ЛиАЗ - 1229 ед., а также около 2 тыс. автомобилей других марок, в том числе иностранных.

Регулярное списание и пополнение стабилизирует возрастную структуру парка при среднем возрасте 5, 5 лет.

Особое внимание, уделяемое автомобилям, занятым на перевозке руды, вскрыши, шлака и основных компонентов металлургического производства, находит отражение в качестве функционирования Центральной автотранс-

портной конторы, в табл.5.1 приведены показатели для автомобилей БелАЗ-75485 за 1997 год.

Таблица 5.1

Эксплуатационные показатели автомобилей БелАЗ-75485
(третья колонна АТО “ЦАТК”)

Наименование показат	Единица измерения	Кол. характеристика
Объем перевозок	тыс.т.	42 196
Грузооборот	тыс.т-км.	146 076
Коэф. исполъз. парка		0,68
Коэф. грузоподъемности		0,87
Коэф. исполъз. пробега		0,45
Время в наряде	час.	12
Среднесуточный пробег	км.	275
Выраб. на один автомо- биль	т.	2 000
“	т-км.	6 920
Выработка за один час	т.	164
“	т-км.	568
Среднесписочное число автомобилей	ед.	83
Грузоподъемность авто- мобиля	т.	42
Общая грузоподъемность	т.	3 486
Автодни в хозяйстве	день.	30 517
Автодни на линии	день.	20 752
Время в наряде	ч.	257 325
Общий пробег	тыс.км.	5 707
Общий пробег с грузом	тыс.км.	2 568
Количество рейсов	ед.	1 156 055
Среднее расстояние	км.	3,46

Автомобили, используемые в транспортном процессе основного производства и на пассажирских перевозках сосредоточены в крупных, оснащенных диагностическим оборудованием автотранспортных предприятиях,

имеющих специализированные зоны технического обслуживания и текущего ремонта.

Диагностирование автомобилей, эксплуатируемых на вспомогательных работах, в коммунальном хозяйстве и т. п., осуществляется в гаражах на участках, приспособленных к проведению работ по техническому обслуживанию и текущему ремонту, с помощью ограниченной номенклатуры приборов на основе интуиции, знаний и навыков высококвалифицированных специалистов.

Автомобили, находящиеся в ведении предприятий геологоразведки, Трубопроводстроя и др., работающих в полевых условиях, проходят технические обслуживания в случайные моменты времени посредством универсальных приспособлений и инструмента.

Квалификация оценивается коэффициентом надежности водителей [186], являющимся численным показателем вероятности его безотказной работы по психофизиологическим показателям, профессиональной подготовленности и социальному поведению, который варьирует в пределах 0,62...0,95. Значимость квалификации находит подтверждение в том, что около 80% повреждений автомобилей происходит в результате аварий по причинам, связанным с надежностью водителей.

Среднее число фиксируемых в Норильском промышленном районе дорожно-транспортных происшествий находится на уровне 170 ДТП ежегодно. Характерным является относительно благополучный 1995 год, когда не получили допуск к работе из-за алкогольного опьянения 774 водителя и все-таки было зарегистрировано 169 дорожно-транспортных происшествий, в которых погибли 17 человек и 195 получили травмы.

5.2 ОРГАНИЗАЦИЯ И ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

При исследовании показателей надежности автомобилей в подавляющем числе случаев приходится иметь дело с контролируруемыми, но трудно управляемыми и трудноизменяемыми факторами, так что целенаправленное варьирование их уровней по изначально выбранному для конкретной ситуации плану если технически и осуществимо, то в организационном и экономическом аспекте совершенно неприемлемо. Поэтому главным методом изучения надежности автомобилей является наблюдение как “восприятие объекта без активного вмешательства в его поведение”, при этом “исследователь вынужден пассивно ожидать естественного проявления необходимых эффектов в поведении объекта, что значительно удлиняет ожидаемое время сбора необходимой информации” [210].

Активный [210, 211, 212, 213, 214] эксперимент имеет много неоспоримых преимуществ, но по своей сути он основан на уже имеющихся знаниях об объекте, что позволяет отбирать факторы, задавать границы факторного пространства, минимизировать число опытов и, построив модель, находить оптимальное решение. Поэтому активный эксперимент эффективен на горизонтальном уровне. Он в большей степени упорядочивает знания и в меньшей - способствует их приобретению. С другой стороны, при активном экспериментировании для исследования явлений в сложных диффузных системах приходится оперировать большим числом факторов, доводя их количество до числа реально воздействующих на объект, сводя по существу активный эксперимент к наблюдению.

Ввиду этого при изучении вопросов надежности автомобилей широко используется наблюдение, тем более, что достижения математической статистики в части обработки результатов позволяют делать выводы, вполне приемлемые с позиций точности и достоверности. Принимая или отвергая вы-

двинутые гипотезы, исследователь продвигается к получению новой информации об объекте, опираясь на реально существующее многообразие процессов, воспроизводящихся сплошь и рядом непрерывно в течение длительного времени. Объем экспериментальных исследований включает получение информации с целью оценки влияния факторов на величину пробега до предельного состояния и годового пробега автомобилей рассматриваемых моделей и их агрегатов, а также данных для построения регрессионных и корреляционных уравнений, описывающих изменение ошибок механизмов подсистем автомобилей в зависимости от пробега.

Общая информация о факторах, имеющих место в эксплуатации, о техническом состоянии автомобилей и о возможностях инженерно-технических служб автотранспортных предприятий не позволяет оценить значимость влияния каждого из уровней факторов на работоспособность, продолжительность их воздействия на конкретный автомобиль или на их совокупность, выполняющую работу в однородных условиях. Т.е. на этом этапе накопления информации уровни факторов представлены в виде кластеров - естественных группировок - причем число их точно не установлено и границы между ними размыты.

Эксперимент и обработка результатов должны устранить расплывчатость, обозначив четкие границы, с тем, чтобы была возможность по заранее определенным признакам относить объекты к соответствующим классам, а также устанавливать зависимости между принадлежностью объекта к данному классу и его показателями эксплуатационной надежности и оценивать вероятность распределения искомых показателей для автомобильных парков [119, 224, 225, 226, 227, 228, 229, 230, 231, 232, 233, 234, 235, 236, 237, 238, 239, 240, 241, 242, 243, 244, 245] .

Коэффициенты корректирования нормативов пробега автомобилей и основных агрегатов до капитального ремонта, разработанные Е.С.Кузнецовым и нашедшие широкое применение в практике автотранспортных предприятий, выбирают в зависимости от условий эксплуатации $-K_1$, в зависимости от модификации подвижного состава $-K_2$, от природно-климатических условий $-K_3$ (в сочетании с коэффициентом, учитывающим агрессивность окружающей среды $K_3 = 0,9$). Но они не исчерпывают совокупности факторов, отрицательно действующих на ресурс автомобилей, эксплуатирующихся на севере. Это прямо следует из работ Е.С.Кузнецова [12, 46], где указывается на существенное влияние на нормативы возрастной структуры парка (коэффициент K_4), качества технического обслуживания и ремонта (коэффициент K_5), квалификации водителей (коэффициент K_6) и приводятся количественные оценки для основных эксплуатационных нормативов за исключением величин коэффициентов, определяющих снижение ресурса.

Целью экспериментальных исследований является получение информации для

n установления значений коэффициентов K_4, K_5, K_6 , а также коэффициента K_7 , корректирующего годовой пробег в зависимости от числа смен работы автомобиля;

n расчета вероятностей рядов распределений значений коэффициентов $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6, K_7$;

n нахождения числовых характеристик пробега автомобиля, соответствующих наработке агрегатов и узлов до предельного состояния для обоснования номенклатуры и числа ремонтных комплектов;

n анализа качества проведения технических обслуживаний и ремонтов;

n установления значимости и эффективности прогнозных экспертных оценок;

п оценивания результатов прогнозирования потребности в ремонтах агрегатов и автомобилей путем проведения опытно-производственной проверки.

Корректирующие коэффициенты по своей природе независимы, между ними отсутствует корреляционная связь, несущественны эффекты взаимодействий и наличествуют формальные предпосылки, позволяющие предполагать существование естественных уровней для каждого из коэффициентов, что подтверждает обработка данных наблюдений и анализ литературных источников [12, 33, 34, 46, 50, 52, 60, 62, 80, 246, 247, 248, 249, 250, 251, 252, 253, 254, 255, 256, 257, 258, 259, 260, 261, 262, 263, 264, 265, 266, 267, 268, 269, 270, 271, 272, 273, 274, 275].

Поэтому основной задачей явилось накопление возможно большей информации о действии исследуемого фактора на интенсивность изменения технического состояния, приводящего к исчерпанию ресурса автомобилей [276, 277, 278, 279, 280, 281, 282, 283, 284, 285, 286, 287, 288, 289, 290, 291, 292, 293, 294, 295, 296, 297, 298, 299, 300, 301].

Исходя из числа фиксируемых вариантов дорожных условий, условий движения и перевозок, проведения технических обслуживаний и текущих ремонтов, квалификации водителей, возрастной структуры парка и числа смен работы, которое для перечисленных факторов равно трем, независимости факторов, подтвержденной многочисленными исследованиями и нашедшей подтверждение в руководящей документации [46], для оценки значимости корректирующих коэффициентов принят план однофакторного дисперсионного анализа, максимально отвечающий характеру проведения эксперимента, в котором затруднено варьирование факторов по уровням, устанавливающий влияние качественного фактора (независимой случайной переменной),

имеющего два или более уровней, на исследуемую величину - признак (зависимую случайную переменную). Его модель

$$y_{ik} = m + A_i + e_{ik},$$

y_{ik} - значение признака y на i -м уровне при k -м повторении опыта; m - среднее значение признака по всем наблюдениям; A_i - эффект фактора A , когда он находится на i -м уровне; e_{ik} - ошибка эксперимента и действие неучтенных факторов, когда A находится на i -м уровне при k -м повторении опыта.

Данные наблюдений заносятся в таблицу и вычисляются групповые средние признака, значимость различий которых необходимо установить.

Таблица 5.2

Компоновка данных однофакторного дисперсионного анализа

№№ пп	Уровни факторов			
	1	2	i	a
1	y_{11}	y_{21}	y_{i1}	y_{a1}
2	y_{12}	y_{22}	y_{i2}	y_{a2}
...	y_{1k}	y_{2k}	y_{ik}	y_{ak}
n	y_{1n}	y_{2n}	y_{in}	y_{an}
Групп. средн.	Y^*_{1}	Y^*_{2}	Y^*_{i}	Y^*_{a}

При общем числе наблюдений $N = na$ проверяется однородность наблюдений с исключением резко выделяющихся значений и рассчитывается полный суммарный квадрат, характеризующий полную изменчивость признака:

$$Q = \sum_{i,k} y_{ik}^2 - \frac{1}{N} \left(\sum_{i,k} y_{ik} \right)^2.$$

Суммарный квадрат, характеризующий отклонение групповых средних от общей средней (он определяет изменчивость признака от действия фактора A , межгрупповой ошибки эксперимента и неучтенных факторов):

$$Q_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a \left(\sum_{k=1}^n y_{ik} \right)^2 - \frac{1}{N} \left(\sum_{i,k} y_{ik} \right)^2.$$

Суммарный квадрат, характеризующий ошибку эксперимента и действие неучтенных факторов в группах наблюдений:

$$Q_2 = \sum_{i,k} y_{ik}^2 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a \left(\sum_{k=1}^n y_{ik} \right)^2.$$

Оценки дисперсий $S^2_1(y) = Q_1/(a-1)$; $S^2_2(y) = Q_2/(N-a)$.

Вычисляя значение F -статистики $F = S^2_1(y)/S^2_2(y)$ и сравнивая ее с критическим величиной $F_{кр}$ при уровне значимости α и числе степеней свободы $f_1 = a-1$ и $f_2 = N-a$, выносят суждение о принятии гипотезы о существенности различия средних значений признака по группам наблюдений.

Минимальное число наблюдений по уровням факторов рассчитывается, исходя из требуемой точности оценивая средних значений признака с использованием формулы:

$$n = S^2(y) t^2_{\text{двуст.кр.}}(a, k) / e^2,$$

где $S^2(y)$ - оценка групповой дисперсии признака, определяемая по мере накопления информации, либо по результатам ранее выполненных исследований, либо на основе принципа максимальной энтропии; $t^2_{\text{двуст.кр.}}$ - критическое значение t -статистики Стьюдента при уровне значимости α и числе степеней свободы k ; e - допустимое отклонение групповой средней от неизвестного математического ожидания исследуемой величины.

Для коэффициента K_4 , оценивающего возрастную структуру парка, естественными группировками являются совокупности новых автомобилей, далее, автомобили, прошедшие один капитальный ремонт, и, наконец, автомобили, бывшие в ремонте два и более раз. Для БелАЗ-75485, например, установлено две группы, поскольку при наработке до предельного состояния после первого капитального ремонта автомобили списываются. Применительно

к агрегатам в первую группу входят новые, во вторую - агрегаты, прошедшие два первых ремонта и в третью - бывшие в ремонте более двух раз.

Для коэффициента K_5 , отражающего качество технических обслуживаний, установлено три группы в соответствии с уровнем механизации процессов ТО и ТР [46]. К первой группе относятся автомобили, эксплуатируемые в полевых условиях в отрыве от постоянных баз, когда обслуживания осуществляются в эпизодически появляющиеся промежутки времени с помощью ручных принадлежностей и инструмента. Второй группе соответствует уровень механизации $U_m = 20\%$, он имеет место при проведении работ на производственных участках, оснащенных механизированным оборудованием. Третья группа включает автомобили, своевременно проходящие ТО и ТР в специализированных зонах по результатам технического диагностирования.

Для коэффициента K_6 , оценивающего надежность водителей, также установлено три группы в соответствии с величиной $P^*(t)$ - оценкой вероятности безотказной работы водителя [186]. К первой группе отнесены водители с $P^*(t) < 0,78$; ко второй - с $P^*(t) = 0,78...0,85$; к третьей - с $P^*(t) > 0,85$. Оценка для вероятности безотказной работы водителя

$$P^*_i(t) = 1 - d_i/d_c,$$

где d_i - количество смен, в течение которых наблюдались отказы i -го водителя; d_c - число рабочих смен водителя в году.

Величина d_i включает число пропущенных смен по причине общих, хронических, эпидемических заболеваний, травматизма, аварий, прогулов, опозданий, отстранений от работы наркологами.

В автотранспортных предприятиях АО Норильский никель: в АТО "ЦАТК", Автотранспортном управлении строительства, в автопарках Комплексной геологоразведочной экспедиции, Трубопроводостроя, Треста механизации и благоустройства и в пассажирском автобусном парке, - в течение

десяти лет шло накопление информации бригадами, каждая из которых состояла из двух-трех специалистов, работающих во взаимодействии с инженерно-техническими службами предприятий.

Сведения о наблюдаемых автомобилях включают дату ввода в эксплуатацию, номер ГАИ, маршруты и их изменения, число смен работы, пробег автомобиля и его агрегатов до предельного состояния и годовой пробег, данные, характеризующие квалификацию водителей (число смен, пропущенных по болезни и по причинам, связанным с алкоголем, число смен, затраченных на устранение последствий аварии), а также изменения в организации проведения технических обслуживаний и текущих ремонтов.

Организация эксперимента с целью получения данных для построения регрессионных и корреляционных линейных уравнений предусматривает измерение ошибок механизмов агрегатов автомобиля с использованием штатных приспособлений и инструмента до ввода их в эксплуатацию и измерений в процессе эксплуатации при проведении технических обслуживаний и текущих ремонтов с фиксацией пробега. Более подробное изложение этих вопросов дано в работах [34, 36].

5.3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРЯДКА ПРОГНОЗНОЙ МОДЕЛИ ПРИ ОДНОФАКТОРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ НА ОСНОВЕ СВОЙСТВ КОНЕЧНЫХ РАЗНОСТЕЙ ПРИ ПОСТОЯННОМ ШАГЕ

Одной из основных операций процедуры построения регрессионной модели является определение порядка параболы, соответствующего точности эксперимента, она осуществляется на основе свойств конечных разностей [215, 216].

Считают, что величины Y_{ij} (значения отклика в точках j при i -х повторениях опытов) случайные и независимые со средними значе-

ниями \bar{y}_j и оценками дисперсий $S^2(y_j)$. Тогда оценка дисперсии средних значений отклика в экспериментальных точках $S_m^2(\bar{y})$ при однородных $S^2(y_j)$ равна

$$S_m^2(\bar{y}) = S^2(y_j) / N. \quad (5.1)$$

Оценки дисперсий конечных разностей первого порядка в точках j

$$S_m^2(\Delta \bar{y}_j) = S_m^2(\bar{y}_{j+1}) + S_m^2(\bar{y}_j).$$

при однородных $S_m^2(\bar{y}_j)$ имеет место равенство

$$S_m^2(\Delta \bar{y}_j) = 2 S_m^2(\bar{y}_j).$$

Конечные разности 2-го, 3-го, . . . , n -го порядка являются зависимыми величинами. В частности, корреляционный момент

$$K(\Delta y_j, \Delta y_{j+1}) = M[y_{j+1} - y_j - m(y_{j+1}) + m(y_j)][y_{j+2} - y_{j+1} - m(y_{j+2}) + m(y_{j+1})] = -D(y_{j+1}).$$

Поэтому дисперсия конечных разностей второго порядка в точках j определяется по формуле

$$S_m^2(\Delta^2 y_j) = S_m^2(\Delta \bar{y}_j) + S_m^2(\Delta \bar{y}_{j+1}) - 2K(\Delta y_j, \Delta y_{j+1}). \quad (5.2)$$

Выражая слагаемые через оценку дисперсии $S_m^2(\bar{y})$ получают

$$S_m^2(\Delta^2 y) = 2S_m^2(\bar{y}) + 2S_m^2(\bar{y}) + 2S_m^2(\bar{y}) = 6S_m^2(\bar{y}). \quad (5.3)$$

Учитывая вышесказанное и применяя оператор математического ожидания для конечных разностей высших порядков, находят соответствующие корреляционные моменты и оценки дисперсий, увеличивающиеся по мере повышения порядка разностей.

Например, $S_m^2(\Delta^3 \bar{y}) = 20S_m^2(\bar{y})$, $S_m^2(\Delta^4 \bar{y}) = 50S_m^2(\bar{y})$ и т. д.

С другой стороны, для параболы n -го порядка [216]

$$\Delta^n y = \text{const.}$$

Оценки дисперсий конечных разностей, характеризующие неадекватность экспериментальных данных параболе порядка $n = 0$ можно записать в виде (5.4)

$$S^2(\Delta^k \bar{y}) = \sum_{j=1}^{m-k} (\Delta^k \bar{y}_j - \Delta^k y_c)^2 / (m-1-k). \quad (5.4)$$

При достаточно малом шаге Δx оценки $S^2(\Delta^k \bar{y})$ уменьшаются при повышении порядка k и при $k = n$ равны нулю.

$$S^2(\bar{y}) > S^2(\Delta \bar{y}) > \dots > S^2(\Delta^k \bar{y}) > \dots > S^2(\Delta^n \bar{y}). \quad (5.5)$$

Неравенство $S^2(\Delta^k \bar{y}) < S^2(\Delta^{k+1} \bar{y})$ означает, что на фоне накопившейся ошибки конечные разности порядка $k+1$ не содержат информации о порядке параболы.

Следовательно, если гипотезу $H_0 : S^2(\Delta^k \bar{y}) = S_m^2(\Delta^k \bar{y})$ не отвергают при уровне значимости α , то при однородных $\Delta^k y_j$ имеет место парабола k -го порядка.

Ниже приводится последовательность определения порядка прогнозной модели.

1. Вычисляют $S^2(\bar{y})$, при $S^2(\bar{y}) < S_m^2(\bar{y})$, и если они неоднородны, следует провести экспериментальные исследования с большей точностью, а при $S^2(\bar{y}) \geq S_m^2(\bar{y})$ переходят к пункту 2.

2. Проверяют гипотезу H_0 , если оценки дисперсий однородны, проверяют однородность \bar{y}_i и \bar{y}_j , в случае их однородности при уровне значимости α порядок уравнения регрессии $n=0$, а при неоднородных \bar{y}_i и \bar{y}_j уменьшают шаг Δx и проводят дополнительные экспериментальные исследования, которые вновь проверяют по пункту 1. Если гипотеза H_0 отвергается, то переходят к шагу 3.

3. Вычисляют конечные разности первого порядка, $S^2(\Delta\bar{y})$ и $S_m^2(\Delta\bar{y})$ и проверяют условие (5.5). Если при этом $S_m^2(\Delta\bar{y}) > S^2(\Delta\bar{y})$, уменьшают шаг и проводят более точные экспериментальные исследования. При $S_m^2(\Delta\bar{y}) \leq S^2(\Delta\bar{y})$, проверяют гипотезу H_0 , если она не отвергается, уравнение регрессии имеет порядок $n = 1$, но, если $S^2(\Delta\bar{y}) > S_m^2(\Delta\bar{y})$, повторяют операцию по этому пункту для конечных разностей второго, третьего, k -го порядка. Если гипотеза H_0 отвергается, итерации заканчивают при $k = m - 1$, считая, что порядок уравнения $n = k$, либо уменьшают шаг Δx , проводят дополнительные эксперименты и возвращаются к пункту 1.

Определив порядок уравнения регрессии, составляют систему нормальных уравнений и вычисляют искомые коэффициенты.

Для наиболее часто встречающихся при исследовании эксплуатационной надежности автомобилей уравнений первого порядка коэффициент при аргументе может быть вычислен по формуле

$$a = \sum_{i=1}^{s-1} i(s-i)\Delta y_i / \sum_{i=1}^{s-1} i(s-i),$$

где s – число экспериментальных точек;

второй коэффициент

$$b = \sum_{i=1}^s (y_i - ax_i) / s,$$

что существенно упрощает расчеты, поскольку конечные разности первого порядка уже найдены при анализе экспериментальных данных.

5.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРЯДКА И ВИДА ПРОГНОЗНОЙ МОДЕЛИ В СЛУЧАЕ МНОГОФАКТОРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ

При построении многофакторных регрессионных зависимостей анализируют частные конечные разности, соблюдая следующий порядок.

1. По данным экспериментальных исследований вычисляют общую среднюю \bar{y}_c и оценку дисперсии $S^2(\bar{y})$, сравнивая ее с оценкой дисперсии средних значений отклика $S_m^2(\bar{y})$. При $S^2(\bar{y}) < S_m^2(\bar{y})$ (в случае их неоднородности) проводят экспериментальные исследования с большей точностью. Если $S^2(\bar{y}) \geq S_m^2(\bar{y})$, то переходят к выполнению пункта 2.

2. Если оценки дисперсий однородны, проверяют гипотезу о равенстве \bar{y}_c и \bar{y} . Если гипотеза не отвергается, порядок уравнения регрессии $n = 0$. При неоднородности \bar{y}_c и \bar{y} уменьшают шаг по всем факторам, проводя дополнительные экспериментальные исследования, и возвращаются к пункту 1. Если гипотеза об однородности оценок дисперсий отвергается, переходят к выполнению пункта 3.

3. Вычисляют частные конечные разности первого порядка по всем факторам $\Delta_{xq}\bar{y}$ и находят общие средние $\Delta_{xq}\bar{y}_c$ и оценки дисперсий $S^2(\Delta_{xq}\bar{y})$:

а) если по какому либо фактору $S^2(\Delta_{xq}\bar{y}) > S^2(\bar{y})$, то либо $n(x_q) = 0$, либо необходимо проведение дополнительных экспериментальных исследований с уменьшенным для этого фактора шагом;

б) из оценок дисперсий $S^2(\Delta_{xq}\bar{y})$ оставшихся факторов выбирают максимальную, как наиболее информативную, и проверяют гипотезу $H_0 : S_{\max}^2(\Delta_{xq}\bar{y}) = S_m^2(\Delta_{xq}\bar{y})$. Если гипотеза не отвергается при уровне значимости α , то значимыми являются линейные эффекты. Если $S_{\max}^2(\Delta_{xq}\bar{y}) > S_m^2(\Delta_{xq}\bar{y})$, то вычисляют частные конечные разности более высокого порядка на основе максимально информативных значений $\Delta_{xq}\bar{y}$. Сравнивая оценки их дисперсий и продолжая действия по пункту 3.б, принимают решения о значимости эффектов факторов и их взаимодействиях, ориентируясь на порядок и вид конечных разностей.

Примеры расчета по изложенным методикам даны в работах [185,189].

5.5. ОЦЕНИВАНИЕ ПОРЯДКА ПРОГНОЗНОЙ МОДЕЛИ ПРИ ПЕРЕМЕННОМ ШАГЕ

При исследовании эксплуатационной надежности автомобилей приходится иметь дело с трудно управляемыми факторами, которые практически невозможно фиксировать на нужных уровнях, так как план эксперимента не всегда может совпадать с планами перевозок, часто подверженных изменениям, вызванными производственной не-

обходимостью. В таких случаях для отыскания порядка модели на фоне ошибок наблюдений отклика, используют разделенные разности, представляемые в виде соотношения (1):

$$[x_i, x_{i+1}] = \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i}, i = \overline{1, m}, \quad (5.6)$$

где $y_{i+1}, y_i, x_{i+1}, x_i$ -соответственно, значения отклика и фактора с номерами $i+1, i; m$ -количество экспериментальных точек.

В дальнейшем предполагается, что по результатам эксперимента, в котором при заданном значении x_i фактора X измеряется N раз отклик y_i , строится регрессионная модель вида

$$y_i = f(x_i) + \varepsilon_i, i = \overline{1, m},$$

где $f(x_i)$ - искомая в классе полиномов функция; ε_i - ошибка эксперимента, имеющая нормальный закон распределения с нулевым средним и дисперсией $S_b^2(y_i)$.

Значения отклика - величины случайные с оценками математических ожиданий \bar{y} и дисперсией воспроизводимости $S_b^2(y_i)$. Как правило, при однородных данных используется средняя оценка дисперсии воспроизводимости

$$S_b^2(y) = \frac{1}{m} \sum S_b^2(y_j)$$

В этом случае оценка дисперсии средних значений отклика при одинаковых числах повторений опытов N составляет

$$S_m^2(\bar{y}) = S_b^2(y) / N.$$

Учитывая, что шаг (периодичность наблюдений) $\Delta x_i = x_i - x_{i+1} \neq const$ - переменная, но неслучайная величина, оценку

дисперсии разделенных разностей первого порядка можно представить в виде

$$S^2[x_i, x_{i+1}] = 2S_m^2(\bar{y})/(\Delta x_i)^2. \quad (5.7)$$

Тогда разделенные разности первого порядка - зависимые величины и их корреляционный момент

$$\begin{aligned} K([x_i, x_{i+1}], [x_{i+1}, x_{i+2}]) &= \\ &= M\left(\left(\frac{y_{i+1}}{\Delta x_i} - \frac{y_i}{\Delta x_i} - m\left(\frac{y_{i+1}}{\Delta x_i}\right) + m\left(\frac{y_i}{\Delta x_i}\right)\right)\left(\frac{y_{i+2}}{\Delta x_{i+1}} - \frac{y_{i+1}}{\Delta x_{i+1}} - m\left(\frac{y_{i+2}}{\Delta x_{i+1}}\right) + m\left(\frac{y_{i+1}}{\Delta x_{i+1}}\right)\right)\right) = \\ &= \frac{D(y_{i+1})}{\Delta x_i \Delta x_{i+1}}. \end{aligned} \quad (5.8)$$

Подставляя в числитель оценку дисперсии средних значений отклика, преобразуют выражение (5.8) к виду

$$K([x_i, x_{i+1}], [x_{i+1}, x_{i+2}]) = -S_m^2(\bar{y})/\Delta x_i \Delta x_{i+1}. \quad (5.9)$$

Поскольку дисперсия разности случайных величин

$$D(U-Z) = D(U) + D(Z) - 2K(U, Z), \quad (5.10)$$

то оценка дисперсии разделенных разностей второго порядка

$$\begin{aligned} S^2[x_i, x_{i+1}, x_{i+2}] &= S^2[x_i, x_{i+1}] + S^2[x_{i+1}, x_{i+2}] - 2K([x_i, x_{i+1}], [x_{i+1}, x_{i+2}]) = \\ &= 2S_m^2(\bar{y})\left(\frac{1}{(\Delta x_i)^2} + \frac{1}{(\Delta x_{i+1})^2} + \frac{1}{\Delta x_i \Delta x_{i+1}}\right) \end{aligned} \quad (5.11)$$

Разделенные разности второго порядка также являются зависимыми величинами:

$$[x_i, x_{i+1}, x_{i+2}] = \left(\frac{y_{i+2}}{\Delta x_{i+1}} - \frac{y_{i+1}}{\Delta x_{i+1}} - \frac{y_{i+1}}{\Delta x_i} + \frac{y_i}{\Delta x_i}\right) \frac{1}{2\Delta x_i}, \quad (5.12)$$

где $2\Delta x_i = x_{i+2} - x_i$.

Корреляционный момент

$$K([x_i, x_{i+1}, x_{i+2}], [x_{i+1}, x_{i+2}, x_{i+3}]) = M \left(\begin{array}{l} ([x_i, x_{i+1}, x_{i+2}] - m[x_i, x_{i+1}, x_{i+2}]) \times \\ \times ([x_{i+1}, x_{i+2}, x_{i+3}] - m[x_{i+1}, x_{i+2}, x_{i+3}]) \end{array} \right) \quad (5.13).$$

Преобразовав формулы (5.12) и (5.13) с использованием оператора математического ожидания, получим:

$$K([x_i, x_{i+1}, x_{i+2}], [x_{i+1}, x_{i+2}, x_{i+3}]) = \frac{S^2(y)}{(2\Delta x_i)(2\Delta x_{i+1})\Delta x_{i+1}} \left(\frac{1}{\Delta x_{i+2}} + \frac{2}{\Delta x_{i+1}} + \frac{1}{\Delta x_i} \right). \quad (5.14)$$

Используя выражения (5.11) и (5.14), преобразуют формулу (5.10) к виду, позволяющему вычислять оценку дисперсии разделенных разностей третьего порядка:

$$S^2[x_i, \dots, x_{i+3}] = 2S_m^2(\bar{y}) \left(\begin{array}{l} \frac{1}{(\Delta x_i)^2} + \frac{2}{(\Delta x_{i+1})^2} + \frac{1}{\Delta x_{i+2}\Delta x_{i+1}} + \frac{1}{\Delta x_i\Delta x_{i+1}} + \\ + \frac{1}{(\Delta x_{i+2})^2} + \frac{1}{(2\Delta x_i)(2\Delta x_{i+1})\Delta x_{i+1}\Delta x_{i+2}} + \\ \frac{2}{(2\Delta x_i)(2\Delta x_{i+1})(\Delta x_{i+1})^2} + \frac{1}{(2\Delta x_i)(2\Delta x_{i+1})\Delta x_{i+1}\Delta x_i} \end{array} \right). \quad (5.15)$$

Предлагаемая методика позволяет численно оценить характеристики разделенных разностей любого порядка. Для параболы n -го порядка

$$[x_i, x_{i+1}, \dots, x_n] = const.$$

Оценки разделенных разностей, характеризующие неадекватность экспериментальных данных параболе порядка $n = 0$, вычисляются следующим образом:

$$S_n^2[x_i, x_{i+1}, \dots, x_p] = \sum_{i=1}^{q-p} \frac{\left([x_i, x_{i+1}, \dots, x_p] - m[x_i, x_{i+1}, \dots, x_p] \right)^2}{(q-1-p)},$$

где q - число экспериментальных точек; p - порядок разделенных разностей.

При достаточно малом шаге Δx_i оценки $S^2_n[x_i, x_{i+1}, \dots, x_p]$ уменьшаются при повышении порядка p и при $p=n+1$ они равны нулю, т. е.

$$S^2_n(y) > S^2_n[x_i, x_{i+1}] > \dots > S^2_n[x_i, x_{i+1}, \dots, x_{n+1}] = 0. \quad (5.16)$$

Неравенство $S^2_n[x_i, x_{i+1}, \dots, x_p] < S^2_n[x_i, x_{i+1}, \dots, x_{p+1}]$ означает, что на фоне накопившейся ошибки разделенные разности $p+1$ не содержат информации о порядке параболы. Следовательно, если гипотеза об адекватности модели порядка p не отвергается при уровне значимости α , то при однородных данных $[x_i, x_{i+1}, \dots, x_p]$ в качестве адекватной модели следует принять параболу порядка p . С целью упрощения вычислений и исключения влияния масштабного фактора при анализе однофакторных и многофакторных зависимостей с переменным шагом необходимо производить кодирование факторов. При этом кодированное значение шага фактора определяется равенством $\Delta x_i = [\Delta X_i (s - 1)] / L$, ($i = 1, 2, \dots, s$),

где ΔX_i - величина шага в натуральных единицах измерения; s - число экспериментальных точек; L - размах варьирования фактора. Принимая за начало отсчета $x_1=0$, получают кодированные значения факторов

$$x_2 = 0 + \Delta x_1; x_3 = x_2 + \Delta x_2; x_n = x_{n-1} + \Delta x_{n-1}.$$

Анализ результатов эксперимента с помощью разделенных разностей дает возможность оценить порядок и вид уравнения регрессии в соответствии с точностью эксперимента. Использование свойств разделенных разностей позволяет сократить объём вычислений при построении прогнозных моделей и составить алгоритм (рис. 5.3) для случаев не равноотстоящих значений факторов. Использование предложенной методики показано в работе [217].

5.6. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ АГРЕГАТОВ ПОСЛЕ РЕМОНТА НА ОСНОВЕ МЕТОДА КОЛЛЕКТИВНОЙ ЭКСПЕРТНОЙ ОЦЕНКИ

Характерной чертой деятельности в ремонте и эксплуатации является относительно быстрое накопление знаний о возможных нарушениях работоспособности, происходящее в течение двух-трех лет при интенсивном использовании даже небольших, исчисляемых единицами, парков автомобилей одной модели. Благодаря повторению ситуаций и постоянному воспроизведению результатов воздействий факторов внешней среды на автомобиль становятся очевидными связи между свойствами элементов конструкции, диагностическими параметрами и показателями надежности. Поэтому на практике суждения о качестве ремонта, выносимые на основе интуиции, зачастую являются хотя и единственной, но достаточно приемлемой информацией для принятия ответственных оперативных решений.

Обработка индивидуальных независимых оценок, выносимых экспертами на основе накопленного практического опыта и знаний, с целью получения обобщенной прогнозной оценки дает возможность учесть влияние максимального числа факторов, определяющих эффективность ремонта. Это достигается включением в экспертную группу специалистов, непосредственно отвечающих за процесс формирования технологических показателей, знающих качество комплектующих изделий и материалов, возможности оборудования, имеющих исчерпывающую информацию о действенности приемочного и оперативного контроля, соблюдения технологической дисциплины, квалификации сборщиков, об обкатке и испытании агрегатов после ремонта, о рекламациях эксплуатационников, об анализе и устранении обнаруживающихся в эксплуатации дефектов ремонта. Круг этих вопросов входит в сферу деятельности начальников цехов, участков, мастеров, технологов, слесарей-

сборщиков, испытателей, непосредственно занятых ремонтом конкретных изделий, которые с разных позиций в силу высокой квалификации и большого опыта работы способны на интуитивном уровне мысленно осознать конечный результат - вероятное значение прогнозируемого показателя в условиях эксплуатации заказчика - на основе информации об известных им факторах.

В группе должны быть эксперты-эксплуатационники, имеющие свои оценки показателей качества ремонта, реализуемых в эксплуатации. Суждения выносятся на основе информации об уровне проведения технических обслуживаний и текущих ремонтов и применяемом при этом оборудовании, приспособлениях, инструменте, о состоянии дорог, наличии и качестве эксплуатационных материалов, квалификации персонала и его приспособленности к работе в экстремальных условиях, а также об условиях движения и перевозок. Поэтому в экспертную группу входят начальники колонн, механики, водители и слесари - специалисты, занятые эксплуатацией автомобилей, организацией и проведением техобслуживаний и текущих ремонтов.

Таблица 5.3

Распределения вероятностей наработки двигателей, соответствующие оценкам экспертов

Эксперты	Календарная наработка t , месяцы								Параметры	
	5	6	7	8	9	10	11	12	$\tilde{t}_i, \text{мес.}$	$\tilde{D}_i, (\text{месяц})^2$
Мастер			0,2	0,2	0,2	0,2	0,2		9	2
Технолог			0,25	0,25	0,25	0,25			8,5	1,25
Слесарь		0,1	0,1	0,1	0,4	0,1	0,1	0,1	9	2,8
Механик	0,1	0,1	0,1	0,4	0,1	0,1	0,1		8	2,8
Водитель			0,1	0,4	0,4	0,1			8,5	0,65

Если эксперт дает интервальную оценку, то в соответствии с принципом максимальной энтропии [176] в строку записываются вероятности равномерного распределения, если эксперт дает интервальную оценку и одному или

нескольким значениям оговаривает особо величину вероятностей, то эти вероятности заносятся в строку, а остальные значения прогнозируемого показателя в данном интервале считаются равновероятными. Оценки числовых характеристик полученных распределений: математических ожиданий и дисперсий - вычисляются по формулам :

$$\tilde{m}_i = \sum_{j=1}^n t_j \tilde{p}_{ji}; \tilde{D}_i = \sum_{j=1}^n (t_j - \tilde{m}_i)^2 \tilde{p}_{j},$$

где t_j - величина j -го значения показателя, предсказанного i -м экспертом; \tilde{p}_j - оценка вероятности j -го значения; n - число разрядов в интервале прогноза i -го эксперта.

Однородность оценок дисперсий, проверенная с помощью критерия Бартлетта [178], и однородность оценок математических ожиданий, оцененная посредством критерия Стьюдента, при уровне значимости $\alpha=0,1$ не отвергает предположения о том, что экспертами оценено влияние на прогнозируемый показатель всей совокупности факторов, действующих в ремонте и в эксплуатации, и что в их оценках нет существенного расхождения.

Неоднородность числовых характеристик свидетельствовала бы о неполном охвате экспертами факторов прогнозного фона или о различии в толковании их роли и значимости. В этом случае следовало бы расширить группу экспертов, получить дополнительные прогнозные оценки и вновь провести проверку однородности числовых характеристик; либо проанализировать условия, для которых экспертами давались прогнозные оценки, и, выделив совокупности однородных мнений, для каждой из них, характеризующих определенные условия эксплуатации, вести дальнейшую обработку.

Компетентность экспертов оценивается весовыми коэффициентами z_i при условии $\sum_{i=1}^m z_i = 1$, где m - число экспертов. Величины z_i выбирают пропорционально стажу работы, количеству наиболее достоверных прогнозов, высказанных ранее и т. п. Если мнения экспертов равноценны (каждый из них хорошо знает свое дело и представляет себе общую картину процесса ремонта и эксплуатации в целом), то $z_i = 1/m$. Умножая вероятности распределений табл. на соответствующие z_i , получают оценки вероятностей для закона распределения системы $P(t, z)$.

Энтропия системы $P(t, z)$ вычисляется по формуле [2]

$$H(t, z) = - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n p_{ij} \log_2 p_{ij},$$

где P_{ij} -вероятность j -го значения показателя, предсказанного i -м экспертом. Используя вместо P_{ij} их оценки, представленные в табл. , вычисляют.

$$H(t, z) = -(5.0,04 \log_2 0,04 + 4.0,05 \log_2 0,05 + 14.0,02 \log_2 0,02 + 4.0,08 \log_2 0,08) = 4,54 \text{ в.ед.}$$

Таблица 5.4

Распределение системы $P(t, z)$

z_i -вес. коэф- фициенты	Календарная наработка t , месяцы							
	5	6	7	8	9	10	11	12
0,2			0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	
0,2			0,05	0,05	0,05	0,05		
0,2		0,02	0,02	0,02	0,08	0,02	0,02	0,02
0,2	0,02	0,02	0,02	0,08	0,02	0,02	0,02	
0,2			0,02	0,08	0,08	0,02		

Максимальная величина энтропии при количестве экспертов m и разрядов вероятных значений показателя n равна двоичному логарифму числа возможных состояний системы $N = n.m$.

$$H_{\max}(t, z) = \log_2 40 = 5,32 \text{ дв.ед.}$$

Разность $|H(t, z) - H_{\max}(t, z)|$ равна количеству информации I , выявленному экспертной группой в результате процедуры разработки прогноза. В рассматриваемой задаче $I = 5,32 - 4,54 = 0,78$ дв.ед., что составляет 14,7 % от исходной энтропии $H_{\max}(t, z)$. Однако $H(t, z)$ и I - величины случайные и значение $I = 0,78$ дв.ед. может оказаться несущественным на фоне возможных ошибок при оценивании экспертами показателя t и действия неучтенных факторов.

Известно, что $H(t, z) = M[-\log_2 P(t, z)]$, где правая часть является математическим ожиданием случайной величины - двоичного логарифма вероятности состояния системы, взятого со знаком минус; значения величины $X = [-\log_2 P(t, z)]$ могут быть вычислены для всех значений показателя t_{ij} , предсказанных экспертами и, следовательно, вычислена оценка дисперсии X .

$$D(X) = \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^n [(-\log_2 p_{ij}) - H(L, z)]^2 p_{ij}, \quad (5.17)$$

где $X_{ij} = (-\log_2 p_{ij})$ - частная информация, содержащаяся в i -м разряде распределения наработки, предсказанной j -м экспертом, n - число разрядов в распределении наработки j -го эксперта.

Однородность $H(L, z)$ и $H_{\max}(L, z)$ проверяется с помощью t -статистики, имеющей распределение Стьюдента с $f = k - 1$ степенями свободы при

$$k = \sum_{i=1}^s n_i.$$

$$t = |H(L, z) - H_{\max}(L, z)| \sqrt{k} / \sqrt{D(X)}.$$

Поскольку в числителе имеет место абсолютное значение разности, то при проверке гипотезы $H_0: H(L, z) = H_{max}(L, z)$ конкурирующей является $H_1: H(L, z) < H_{max}(L, z)$. Если величина критерия при уровне значимости α и числе степеней свободы $f = \kappa - 1$ меньше найденного значения t , то нулевая гипотеза отвергается, следовательно, разность $|H(L, z) - H_{max}(L, z)|$ существенна. Просуммировав столбцы табл. 5.4, получают исчерпывающую характеристику прогноза – оценку для закона распределения прогнозируемого показателя.

Таблица 5.5

Ряд распределения наработки двигателей ЗИЛ-130 после ремонта

t , мес.	5	6	7	8	9	10	11	12
P	0,02	0,04	0,15	0,27	0,27	0,15	0,08	0,02

Оценки числовых характеристик распределения: $m^*(t) = 8,6$ мес.; $D^*(t) = 2,03$ (мес.)²

Проведенные в эксплуатации наблюдения за капитально отремонтированными двигателями ЗИЛ-130 дали результат: при распределении пробега близком к нормальному оценки числовых характеристик оказались однородными с оценками, полученными экспертным методом. При использовании их для определения годовой программы капитального ремонта агрегатов при величине парка 100 автомобилей ошибка составила около десяти процентов.

Получение прогнозных оценок путем обработки мнений экспертов отличается простотой и требует минимальных затрат средств, труда и времени. Несложная программа для ЭВМ позволит эффективно использовать для принятия оперативных решений как в ремонтной, так и в эксплуатационной практике ценнейшую информацию, носителями которой являются знающие и опытные специалисты.

5.7. ОПЫТНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ПРОВЕРКА ПРОГНОЗНЫХ МОДЕЛЕЙ ПОТРЕБНОСТИ В РЕМОНТАХ АГРЕГАТОВ И АВТОМОБИЛЕЙ

Минимальный объем выборки для проверки соответствия прогнозной модели совокупности событий, совершившихся в реальных условиях эксплуатации зависит от степени неопределенности системы, измеряемой энтропией. Она, в свою очередь, является функцией числа возможных состояний и их вероятностей. Для наиболее часто встречающихся предельных распределений энтропия выражается аналитически в зависимости от дисперсии, обуславливающей число состояний и их вероятности при известной точности измерений.

Идентификация распределений, относящихся к одному типу, производится с помощью метода моментов. Для двухпараметрических распределений, характеризующих, в частности, величину пробега до предельного состояния при постепенных отказах, требуется совпадение первого начального и второго центрального моментов [2]. В случае точечного прогноза, когда результат представляется “в виде единственного значения характеристики объекта прогнозирования без указания доверительного интервала” [132], что имеет место при определении программы ремонтного предприятия, цеха, участка, достаточно совпадения одного параметра – среднего значения как максимально правдоподобной оценки математического ожидания возможного будущего состояния объекта прогнозирования.

Однако предельные законы имеют максимальную энтропию и поэтому дают пессимистичную, завышенную, оценку n - объема выборки для вынесения суждения об однородности неизвестных математических ожиданий и дисперсий прогнозируемых величин:

$$n = t^2_{\text{двуст.кр.}} D^*(X) / \epsilon^2,$$

где $t_{\text{двуст.кр.}}$ - критическое значение t -статистики Стьюдента; $D^*(X)$ – оценка дисперсии исследуемого объекта; ϵ - допустимая погрешность.

Еще более пессимистичную оценку, но зато более надежную в смысле минимизации возможной ошибки прогноза дает формула (2.4)

$$n \geq D^*(X) / \epsilon (1 - P_d).$$

Она приемлема для любых распределений. Это преимущество позволяет использовать ее для мгновенных распределений прогнозируемых показателей, найденных численным методом. Для применения приведенных формул необходимо иметь априорные оценки дисперсий исследуемых величин. Когда их нет, что чаще всего и бывает, в первом приближении используют дисперсию распределения, имеющую максимальную энтропию, например, равномерного при известных границах варьирования состояний объекта. По мере накопления информации объем выборок уточняется.

Уровень доверительной вероятности зависит от соотношения числа и значимости воздействий факторов на прогнозируемую величину и числа и значимости факторов, учитываемых прогнозной моделью. Поскольку априори достаточно достоверно оценить это соотношение трудно, то используют экспертные оценки в сочетании с технико-экономическим расчетом, минимизируя возможные потери от ошибочного прогноза, а затем по мере накопления знаний о поведении объекта, уточняют величину уровня значимости.

Опыт внедрения заводской аттестации качества капитально отремонтированных изделий на АРЕМЗ-1 и последовавшие за этим серии наблюдений в эксплуатации показали, что вполне приемлемым для практики является 75...80% уровень доверительной вероятности. Он дает возможность прогнозировать минимальную гарантированную наработку до предельного состояния серийно выпускаемых из ремонта изделий с погрешностью, которая не превышает 10%. При этом создаются условия для минимизации ошибки второго рода, обуславливающей возможные потери потребителя – службы эксплуатации.

Более высокий уровень доверительной вероятности ($P_0 = 0,9...0,95$) применим для узлов и деталей, технология ремонта которых тождественна технологии изготовления и подкреплена соответствующим материально-техническим обеспечением [7,9, 302,303, 304, 305,306]. К таким узлам и деталям относятся топливные и масляные насосы, форсунки, гильзы цилиндров, коленчатые валы, восстанавливаемые методом ремонтных размеров, и т.п.

Результаты наблюдений анализируют, чтобы исключить резко выделяющиеся значения исследуемой величины из-за грубых ошибок при случайном просчете в процессе ремонта, эксплуатации и формирования прогнозной модели. Основные критерии разделены на четыре класса [178] в зависимости от качества информации о параметрах выборочного распределения. Поскольку вычисление соответствующих статистик и правила использования таблиц идентичны для всех четырех классов, рассматривается наиболее часто встречающийся случай, когда параметры распределения неизвестны и заменены их оценками, найденными по небольшой выборке. Результаты опытов X_i

располагаются в виде вариационного ряда в возрастающем порядке $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_i \leq \dots \leq x_n$.

Нулевая гипотеза, подлежащая проверке, $H_0: \bar{x} = x_{im}$, конкурирующая $H: \bar{x} \neq x_{im}$, здесь $\bar{x} = (1/n) \sum_{i=1}^n x_i$, x_{im} - максимальное по абсолютной величине выборочное отклонение. Величина V -статистики: $V(\bar{x}, s) = |x_{im} - \bar{x}| / s$, где s - оценка среднего квадратического отклонения выборки. При $V(\bar{x}, s) < V(n, a)$ нулевую гипотезу не отвергают.

В случае большого объема выборки используют критерии, статистики которых задаются отношениями, например,

$(x_n - x_{n-1}) / (x_n - x_1); (x_n - x_{n-1}) / (x_n - x_2); (x_n - x_{n-2}) / (x_n - x_1)$, где x_n ,

$x_{n-1}, x_{n-2}, x_1, x_2$ - соответственно, последний, предпоследний, третий от конца, первый и второй члены вариационного ряда. Если вычисленные отношения не превышают критических при уровне значимости a , то нуль-гипотезу об однородности данных не отвергают.

Для сравнения оценок дисперсий S^2_1, S^2_2 генеральных совокупностей, распределенных нормально, используют критерий Фишера. Вычисляют отношение большей оценки к меньшей и полученное значение F -статистики сравнивают с критической величиной $F_{кр}$ при заданном уровне значимости a и числе степеней свободы $k_1 = n_1 - 1; k_2 = n_2 - 1$, где n_1, n_2 - объемы соответствующих выборок. При $F < F_{кр}$ нет оснований отвергать гипотезу о равенстве генеральных дисперсий или однородности их оценок.

Мощность критерия Фишера $P(a / k_1, k_2, a)$ при уровне значимости a и числах степеней свободы k_1, k_2 , где $a = (\bar{L})^2 / [(S_1^2 + S_2^2) / 2]$,

(\bar{L} – среднее значение исследуемого параметра) определяют по табл. 4.12 [178], вычислив значение функции $j = \sqrt{a / (k_1 + 1)}$. Ошибка второго рода (риск потребителя, которым является служба эксплуатации) $b = 1 - P(a / k_1, k_2, a)$.

Сравнение двух средних значений осуществляют с помощью критерия Стьюдента, предварительно оценив однородность оценок дисперсий, значение t -статистики

$$t = |L^*_1 - L^*_2| [nm(n + m - 2) / (n + m)]^{0,5} [(n - 1)S^2_1 + (m - 1)S^2_2]^{-0,5}.$$

Конкурирующая гипотеза предусматривает, что $L^*_1 \neq L^*_2$, поэтому критическая область двусторонняя. При уровне значимости α

и числе степеней свободы $k = n + m - 2$ по таблице 3.2 [178] находят $t_{кр}$. Если значение t -статистики больше критического, гипотезу о равенстве средних отвергают.

Для определения мощности критерия Стьюдента вычисляют значение функции $\phi = 2^{-0,5} C$, где $C = (L^*_1 - L^*_2) S^{-1} [(nm / (n + m))]^{0,5}$,

$S = [(n - m)(nS^2_1 + mS^2_2) / nm (n + m - 2)]^{0,5}$. Мощность критерия $P\{|t(j)| \geq t_{кр}\}$ находят по табл. 4.11 [178]. Расчеты, связанные с обработкой данных наблюдений представлены в приложениях.

Процесс проведения наблюдений и фиксирования результатов осуществляется бригадами, работающими в контакте со слесарями – ремонтниками, водителями, механиками, мастерами и руководителями технических служб. Исследования, начатые в 1984 году, не прерываются благодаря тесным производственным связям

института, работающего по системе “завод-втуз”, с автотранспортными предприятиями Норильского промышленного района, где 90% руководителей всех звеньев являются выпускниками кафедры.

За каждой бригадой из двух-трех студентов, состоящих в штате АТП, закреплены группы автомобилей. На каждый автомобиль ведется досье с момента ввода его в эксплуатацию. Помимо паспортных данных фиксируется квалификация водителей, маршруты, своевременность проведения ТО и ТР, сроки замен и пробеги основных агрегатов до предельного состояния.

При поступлении в ремонт и разборке записываются данные о техническом состоянии ответственных сопряжений и уточняются причины выхода из строя агрегата. В ремонтах участвуют все члены бригад: и те, кто работают водителями (при ремонте своих автомобилей) и те, кто работают ремонтниками. При этом (по возможности) контролируется соблюдение технических условий на ремонт, продолжительность ремонта и его фактическая трудоемкость по данным ОТиЗ.

Информация, собранная в АТП, является базовой при выполнении курсового проекта по технологии производства машин и дипломного проекта.

В процессе накопления информации разрабатывались прогнозы наработок агрегатов до предельного состояния, потребности в ремонтах автомобилей и агрегатов (рис.5.4). Это позволяло осуществлять верификацию, уточнять значения корректирующих коэффициентов, совершенствуя методы прогнозирования. Некоторые данные, использованные в этом процессе, проведены в приложениях.

5.8. ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ

1. Специфичность условий эксплуатации, определяемая широкой вариацией дорожных условий, условий движения, перевозок технологических грузов, природно-климатических условий и агрессивностью окружающей среды, усиливаемых полярной ночью, резкими перепадами давлений, температуры, а также магнитными бурями, отрицательно влияющими на надежность системы “водитель – автомобиль – дорога – среда”, разнообразие моделей автомобилей, существенная разница в качестве проведения технических обслуживаний определяют особенности подхода к решению задач поддержания эксплуатационной надежности автомобилей, эксплуатируемых на севере.

2. Большое число неуправляемых и трудноизменяемых факторов, обуславливающих невозможность или нецелесообразность их целенаправленного варьирования предполагает использование наблюдений как главного метода изучения надежности автомобилей, имеющего безусловные достоинства, выражающиеся в фиксации естественно протекающих в существующих производственных условиях процессов, формирующих реальные взаимодействия факторов, влияющих на надежность, что с лихвой компенсирует длительность и трудоемкость этого метода.

3. Анализ свойств конечных разностей показывает, что однородность их оценок дисперсий, а также однородность разностей и их средних значений, получаемых при обработке наблюдений, позволяют оценить порядок однофакторного уравнения регрессии при постоянном шаге, сокращая объем вычислений, и получить уравнение, адекватное экспериментальным данным.

4. Результаты исследования и анализа частных конечных разностей и их свойств дают возможность сформулировать удобную для составления машинных программ последовательность определения порядка и вида многофакторного уравнения регрессии, адекватного данным наблюдений, максимально используя полученную информацию и сокращая объем вычислений.

5. Исследованные свойства разделенных разностей позволяют оценить порядок уравнения регрессии при однофакторной зависимости и порядок и вид уравнения при многофакторной, адекватно описывающего данные эксперимента, получаемые при наблюдении за системой, подверженной воздействию трудноуправляемых факторов, обуславливающих переменный шаг фиксирования значений отклика.

6. Обработка индивидуальных независимых мнений, выносимых экспертами на основе накопленного практического опыта и знаний с целью выявления и учета факторов, при достаточно существенном количестве информации, содержащемся в результатах процедуры опроса, позволяет рассматривать их не только как предварительные сведения для планирования эксперимента, но и как предварительную прогнозную оценку.

7. Проведение эксперимента имеет своей целью построение модели прогнозирования – закона распределения потребности в ремонтах автомобилей и агрегатов. Для этого были проведены отсеивающие эксперименты, позволившие выявить и отобрать значимые факторы, а также эксперименты, позволившие на основе дисперсионного анализа найти оценки вероятностей для законов распределения величин факторов, существенно влияющих на исследуемый показатель.