системы топливоподачи и по абсолютной разности (при сравнении со значениями заведомо исправной системы) позволяют сделать вывод о техническом состоянии приборов системы питания двигателя, что значительно повышает контролепригодность и снижает трудозатраты процесса диагностирования.

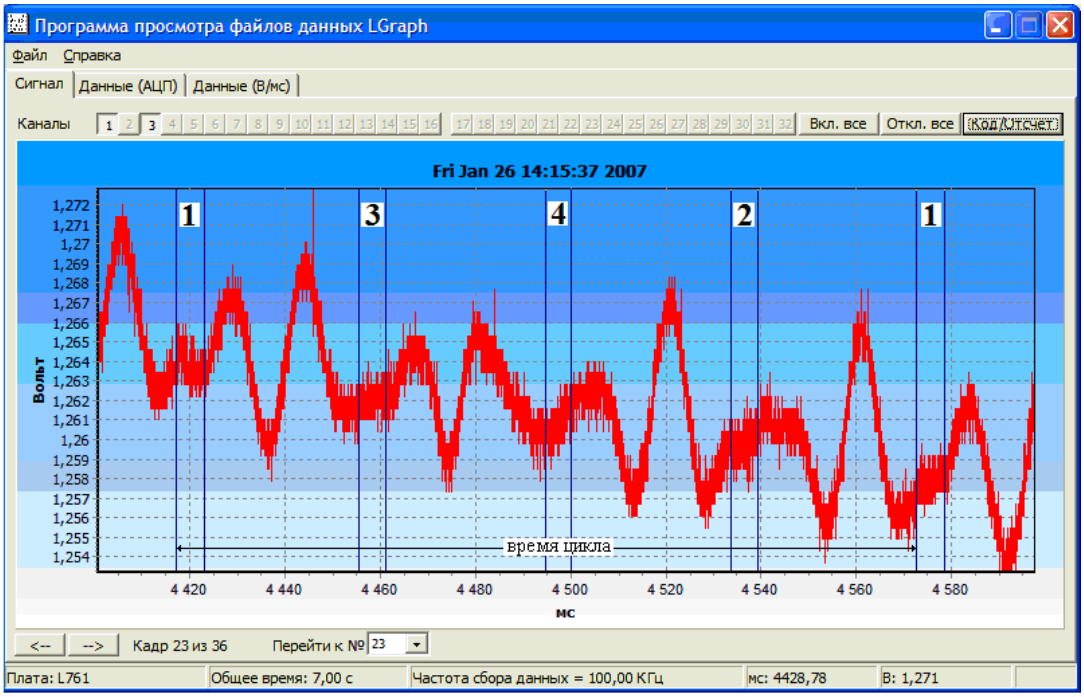

Рис. 2. Осциллограмма изменения давления топлива в топливной рампе системы питания двигателя с впрыскиванием бензина

Литература:

1. Филиппов А.З. Токсичность отработавших газов тепловых двигателей. – Киев: Вища школа. Головное изд-во, 1980. – 160 с.

2. Росс Твег. Системы впрыска бензина. Устройство, обслуживание, ремонт: Практ. пособ. – М.: Издательство «За рулем», 1999. – 144 с., ил.

3. Аппаратура впрыска легкого топлива автомобильных двигателей / Ю. И.Будыко, Ю. В. Духнин, В. Э. Коганер, К. М. Маскенсков; Под общ.ред. Ю. И. Будыко. — 2-е изд., перераб. и доп. — Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1982 — 144 с., ил

4. Ерохов В.И. Системы впрыска легковых автомобилей: эксплуатация, диагностика, техническое обслуживание и ремонт / В.И. Ерохов. – М.: ООО «Издательство Астрель»: ООО «Издательство АСТ»: ООО «Транзиткнига», 2003.–159с.

5. Патент на изобретение № 2291983 от 20.01.07 г.

РАНГОВЫЙ МЕТОД ДИАГНОСТИКИ КАЧЕСТВА МАШИН

Костюков В.Н., Костюков А.В. (НПЦ «Динамика», г. Омск)

В работе предлагается метод адаптивной безэталонной диагностики машин на основе анализа виброакустических и им подобных сигналов связанных с ненаблюдаемыми погрешностями машин и агрегатов возникающих при изготовлении и в эксплуатации, часть из которых не имеет адекватного представления в шкалах отношения и интервалов. Выведено каноническое уравнение связи между диагностическими признаками сигнала и структурными параметрами состояния машины, приведены результаты моделирования и экспериментов.

Использование методов виброакустической диагностики для оценки технического состояния машин позволяет управлять качеством эксплуатации выпускаемых и ремонтируемых машин путем целенаправленной доработки тех из них, которые имеют неблагоприятное сочетание допусков комплектующих деталей и дефектов возникающих в эксплуатации. Качество машины, с точки зрения динамики ее функционирования, характеризуется комплексным показателем, составленным из частных диагностических признаков, каждый из которых отражает состояние определенного узла машины и рассматривается как единичный показатель ее качества. Значение частного диагностического признака вычисляется как норма соответствующего блока спектральной матрицы сигнала [1], содержащего определенный "тип" составляющих. При виброакустической диагностике собственно погрешности деталей (структурные параметры) X недоступны для непосредственного наблюдения, а оценка этих погрешностей производится по результатам Y косвенных измерений наблюдаемых параметров вибрации, причем уравнение нелинейной регрессионной связи $y = f(x)$ и двумерная плотность совместного распределения $w_2(x,y)$, как правило, неизвестны. Задача диагностики машин, существенно упрощается, если ввести такие нелинейные преобразования ненаблюдаемых структурных параметров $u = F_x(x)$ и наблюдаемых диагностических признаков $v = F_y(y)$, которые обеспечивают линейную регрессионную связь между ними [2]. Упрощение при этом достигается за счет того, что отпадает необходимость восстановления регрессионной зависимости $y = f(x)$, а значения диагностируемых структурных параметров при необходимости могут быть найдены из решения уравнения $x = F_x^{-1}(u)$, где $F^{-1}(...)$ - символ обратной функции, причем комплексный показатель качества машины является несмещенной и состоятельной оценкой его обобщенной погрешности.

В общем случае связь между X и Y устанавливается двумерной плотностью совместного распределения $w_2(x,y)$. Рассмотрим функциональные преобразования X и Y

$$u = F_x(x) = P(X < x) = \int_{-\infty}^{x} w_1(x)dx \quad ; \qquad v = F_y(y) = P(Y < y) = \int_{-\infty}^{y} w_1(y)dy \quad , \tag{1}$$

где $F_x(x)$, $u = F_y(y)$ - функции распределения соответственно X и Y;

$w_1(x)$, $w_1(y)$ - соответствующие одномерные плотности распределения.

Распределение случайных величин u и v являются равномерными в интервале [0,1]. На основе исследования свойств плотности $w_2(u,v)$ преобразованных величин получим уравнение связи между ними:

$$u - v = \int_{v}^{1} F_2(u/v)dv - \int_{u}^{1} F_2(v/u)du = \Delta_1; \qquad \Delta_2 = u - v = -\Delta_1. \tag{2}$$

Интересно отметить, что это уравнение симметрично относительно своих переменных u и v. В этой симметрии нашел отражение принцип равенства взаимной информации, которая содержится в каждой из переменных u, v о другой. Необходимо подчеркнуть, что уравнение (2) получено без каких-либо предположений о виде законов распределения $w_1(x)$, $w_1(y)$ и нелинейности стохастической зависимости $y = f(x)$ и носит, таким образом, общий характер. Наличие статистической связи между X и Y является не только необходимым, но и достаточным условием для оценки значения функции распределения погрешности $u = F_x(x)$, а следовательно и самого значения погрешности X, по значению функции распределения наблюдаемого вибропараметра $v = F_y(y)$.

Разность интегралов в (2) определяет ошибку оценки одной из величин u(v) по известной другой v(u). Учитывая, что плотность распределения ошибки есть четная функция, то все моменты нечетных порядков, в том числе математическое ожидание

ошибки m(Δ), равны нулю. Отсюда, регрессия функции распределения ненаблюдаемого структурного параметра u на функцию распределения наблюдаемого диагностического признака v совпадает с биссектрисой первого координатного угла информационной плоскости:

$$\bar{u} = v_0, \tag{3}$$

где $\bar{u}$ - условное среднее при измеренном и зафиксированном v_0.

Значение функции распределения ненаблюдаемого структурного параметра, реализованного в результате сборки машины или возникшего в эксплуатации, u, может быть достаточно точно определено при многократных измерениях значений функции распределения соответствующего диагностического признака v: $u_0 = m(v)$. Дисперсия ошибки D(Δ) определяется через коэффициент корреляции ρ_{uv}, показывающий степень связи между случайными величинами u и v, а последний совпадает с коэффициентом ранговой корреляции Спирмена ρ_S:

$$D(\Delta) = (1 - \rho_S)/6 \tag{4}$$

Оценка максимального значения ошибки Δ, т.е. зоны разброса u при зафиксированном v_0 в первом приближении с доверительной вероятностью Q определяется путем разложения плотности в ряд Тейлора и путем дальнейших несложных преобразований получим:

$$|u - v| = |\Delta| \le Q/2\Delta w_2(v_0/v_0); \quad |\Delta| = |u - v| \le Q\sqrt{(1 - \rho_S)/2} \tag{5}$$

При жесткой связи, когда $\rho_S = 1$, ошибка оценки u по значению v равна нулю. Рассмотрим пример, когда $w_2(x,y)$ представляет собой двумерную нормальную функцию распределения. Преобразуя $w_2(x,y)$ в $w_2(u,v)$, получим совместное распределение функций u и v, которое при u = v имеет вид:

$$w_2(v/v) = \frac{\exp\left\{r\left[F^{-1}(v)\right]^2/(1+r)\right\}}{\sqrt{1-r^2}}. \tag{6}$$

где r – коэффициент корреляции между X и Y; $F^{-1}(...)$-функция обратная функции нормального распределения.

Как показывает уравнение (6), при жесткой функциональной связи между X и Y, когда r = 1, $w_2(v/v) = \infty$, а ошибка Δ в (5) равна нулю и мы имеем строгое равенство u=v. Если связь между X и Y отсутствует, r = 0, $w_2(v/v) = 1$, ошибка в (5) достигает максимального значения и по наблюдениям Y нельзя судить об X.

На рис.1 и 2 приведены графики связи между u и v при различных коэффициентах корреляции r и доверительных вероятностях Q построенные по выражениям (7) и (8). Результаты моделирования позволяют сделать следующие выводы. Наибольшая неопределенность оценки неизвестной погрешности машины u наблюдается при значении диагностического признака сигнала v = 0,5 что связано с соответствующим свойством энтропии. В практически важных случаях, когда v > 0,8 (машины с наибольшими погрешностями и значительными неисправностями) и v < 0,2 (машины с минимальными погрешностями изготовления и сборки) погрешность оценки u не превышает 0.2 даже при относительно слабой стохастической связи (r = 0.7) между структурными параметрами X и диагностическими признаками Y. Это исключает необходимость обучения систем диагностики по машинам-эталонам с известными погрешностями и значительно сокращает затраты и сроки внедрения диагностических систем в производстве.

Комплексный показатель качества машины целесообразно представить в виде процентного ранга средневзвешенной суммы функций распределения вибрацион-

ных, температурных, расходно-весовых др. параметров машины. При этом важно, чтобы параметр, характеризующий качество машины, изменялся согласованно с остальными при изменении характеристики качества в сторону улучшения или ухудшения. При таком подходе снимаются проблемы разнообразия шкал и размерности физических величин, характеризующих качество машины. Возможно также использование качественных, балльных, оценок. Единственным условием при этом является согласованное монотонное изменение всех показателей. Если какой-либо из показателей меняется в обратном направлении, то для включения в обобщенную оценку можно взять его отрицательную или обратную величину, что инвариантно для рангового преобразования.

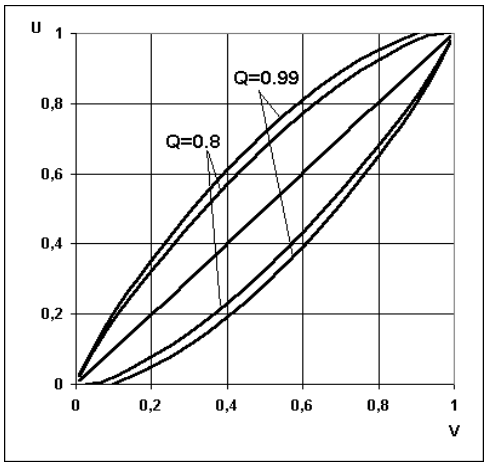

Рис.1

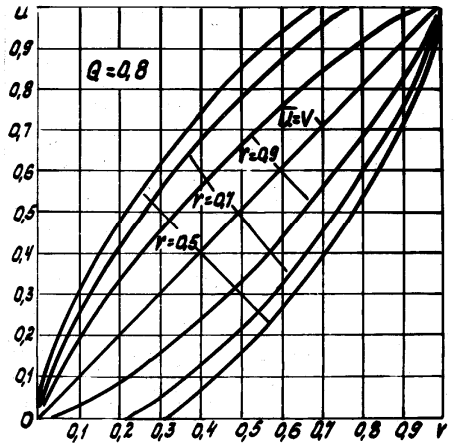

Рис.2

Рассматривая функции распределения (ФР) структурных параметров объекта (погрешностей его деталей и их взаимного сопряжения при сборке) как частные показатели качества, каждый из которых имеет равновероятное распределение и изменяется в диапазоне от 0 до 1, за характеристику качества объекта в целом примем его обобщенный структурный параметр, выраженный через взвешенную сумму функций распределения частных параметров.

$$R_u = \sum_{j=1}^{m} \alpha_j u_j \quad , \quad \sum_{j=1}^{m} \alpha_j = 1 \quad , \quad |\alpha_j| < 1 \; . \tag{7}$$

Весовые коэффициенты α_j пропорциональны влиянию j-й погрешности на прогнозируемую характеристику объекта, например его ресурс. Если все погрешности максимальны $u_j \to 1$, то $R_u \to 1$ и такой объект имеет наихудшее качество и малый, при прочих равных условиях, потенциальный ресурс. Если все погрешности минимальны $u_j \to 0$, то $R_u \to 0$ и такой объект обладает наивысшим качеством, а его потенциальный ресурс наибольший. Среди этих крайних точек располагается вся масса выпускаемых объектов (машин, агрегатов, двигателей и т.д.). Очевидно, что аналогичная закономерность справедлива и для обобщенного диагностического признака, вычисляемого через взвешенную сумму ФР частных диагностических признаков.

$$R_v = \sum_{i=1}^{n} \beta_i v_i \quad , \quad \sum_{i=1}^{n} \beta_i = 1 \quad , \quad |\beta_i| < 1 \; . \tag{8}$$

Необходимо иметь в виду, что изменения u_j и v_j в соотношениях (7), (8) должны быть согласованы. Законы распределения R_u и R_v являются композициями законов распределения слагаемых u_j и v_j соответственно, поэтому выводы, полученные в предыдущих пунктах, к ним непосредственно не применимы. Чтобы обойти эту

трудность, перейдем к рассмотрению их функций распределения $P_u=F_u(R_u)$, выражающей обобщенную погрешность машины, и $P_v=F_v(R_v)$, являющейся комплексным виброакустическим показателем ее качества. Для них справедливо соотношение (3), согласно которому комплексный показатель качества P_v является несмещенной и равномерно распределенной в интервале [0, 1] оценкой обобщенной погрешности насоса.

На практике значения P_u, P_v находят из эмпирических функций распределения $F_{uэ}(R_u)$, $F_{vэ}(R_v)$, которые являются несмещенными и состоятельными оценками теоретических функций распределения $F_u(\bullet)$,$F_v(\bullet)$ соответственно.

Для упрощения терминологии значения P_u, P_v будем называть «процентным рангом». Ошибка Δ_p оценки P_u по измеренному P_v, а следовательно и ошибка прогнозирования ресурса, зависят от согласованности изменения R_u и R_v, то есть от выбора весовых коэффициентов α_j и β_i, который осуществляется экспериментально. В силу монотонности ранговых преобразований Δ_p тем меньше, чем меньше ошибка Δ_R оценки R_u по R_v :

$$\Delta_R = R_u - R_v = R_u - \sum_{i=1}^{n} \beta_i \Delta_i ,$$

где Δ_i – ошибка оценки обобщенного структурного параметра по частному диагностическому признаку v_i. Можно показать, что дисперсия ошибки Δ_R, а следовательно и Δ_p, уменьшается с увеличением числа независимых диагностических признаков, используемых для диагностики, и стремится к нулю при $n\to\infty$, так как Δ_i имеет ограниченный диапазон измерения. Таким образом, комплексный виброакустический показатель качества насоса P_v, вычисляемый как процентный ранг средневзвешенной суммы функций распределения вибропараметров является несмещенной и состоятельной оценкой обобщенной погрешности машины P_u, является комплексным показателем ее качества и имеет нормированный диапазон изменения от 0 до 1. Каждый частный показатель качества также имеет нормированный диапазон изменения от 0 до 1 и не зависит от параметров законов распределения диагностических признаков. Численные значения частных показателей и ранга имеют смысл вероятностей. Для реализации метода разработано методическое и программно-аппаратное обеспечение [3-5]. Процедура диагностики качества объекта легко может быть сделана самообучающейся, если в процессе диагностирования в памяти ЭВМ будет сохраняться информации о К последних продиагностированных объектах. При поступлении нового объекта его параметры запоминаются, а параметры наиболее «старого», из хранящихся в памяти ЭВМ, стираются.

Для экспериментальной проверки использовались вибропараметры 100 произвольно выбранных на приемосдаточных испытаниях шестеренных топливных насосов. В эту совокупность включены насосы с заведомо известными погрешностями изготовления и сборки. Измерены их вибропараметры и проведена оценка их положения в общей выборке путем ранжирования. Количественной характеристикой связи между погрешностями насоса и его вибропараметрами является коэффициент ранговой корреляции Спирмена, который вычислялся по формуле:

$$\rho_S = 1 - \frac{6}{n - 1/n} \sum_{i=1}^{n} (v_i - u_i)^2 , \qquad (9)$$

где v_i, u_i - ранги по вибропараметрам и погрешностям соответственно; n - число насосов.

Во всех случаях ρ_S значим на 5%-ном уровне (для n =23 граничное значение ρ_S =0,35). Для проверки гипотезы о линейности экспериментально полученной регрессионной зависимости (3) были исследованы параметры A и B линейной зависимости $V_{ij} = A_j + B_i u_{ij}$, $i = 1, ..., 23$; $j = 1, ..., 10$, рассчитанной методом наименьших квадратов и определены оценки среднеквадратического отклонения коэффициентов регрессии S_A и S_B. Отклонения коэффициентов A и B от 0 и 1 соответственно оказались незначимы. На рис.3 приведена регрессия третьего порядка уровня зубцовых гармоник вибросигнала шестеренного насоса на среднюю разность шагов в зацеплении шестерен, полученной для этой совокупности насосов. Разброс точек около кривой регрессии отражает стохастический характер зависимости вибрации от погрешности. Зависимость вибросигнала от максимальной разности шагов в зацеплении имеет другой вид, но также нелинейна и стохастична. Каноническая же зависимость, приведенная на рис. 4 между рангами по вибрации и рангами по погрешностям имеет стандартный красивый и строгий вид. Разброс точек около прямой не выходит за пределы указанные в (4), определяемые коэффициентом ранговой корреляции Спирмена.

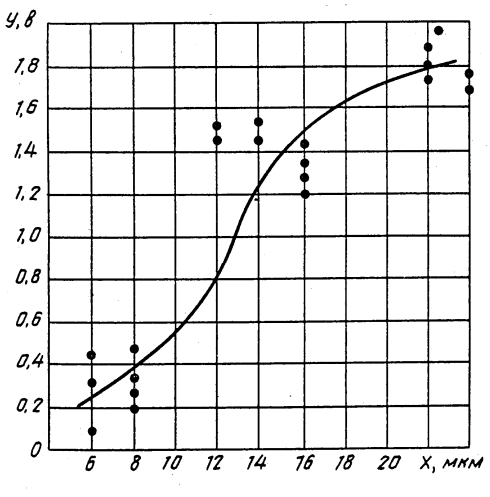

Рис.3

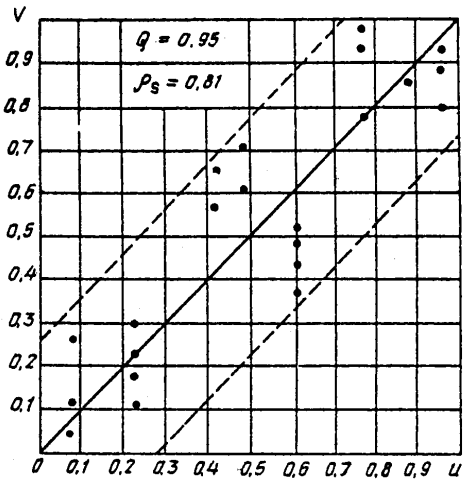

Рис.4

Как показано выше процентный ранг Pu средневзвешенной суммы функций распределения погрешностей изготовления насоса Ru должен соответствовать процентному рангу Pv средневзвешенной суммы функций распределения его вибропараметров Rv.

Для проверки этого положения был проведен микрообмер деталей шести шестеренных насосов с различными уровнями виброактивности, выбранными на приемосдаточных испытаниях. Для обработки по ранговому методу были взяты верхние значения результатов микрообмера. Оценивались следующие погрешности: разноразмерность роликов подшипников, зазор по роликоподшипникам, конусность и овальность цапф шестерен, обойм и стаканов, зазор по лыскам обойм и стаканов, взаимное биение цапф шестерен, биение торцов шестерен относительно цапф, биение наружных торцов обойм и стаканов, неперпендикулярность расточек корпуса плоскости разъема, неперпендикулярность расточек относительно дна корпуса, перекрещивание осей шестерен от разноразмерности обойм, стаканов и зазора в роликоподшипниках, средняя разность шагов в зацеплении шестерен. По ним был вычислен средневзвешенный ранг 12 погрешностей изготовления насоса. При этом весовой коэффициент средней разности шагов в зацеплении шестерен α=4/15, а

остальных погрешностей $\alpha 1=...=\alpha 11=1/15$. Был также определен среднеарифметический ранг Rv системы из 26 виброакустических показателей на приемосдаточных испытаниях, по выборке, содержащей 100 насосов, до разборки микрообмеряемых насосов. Весовые коэффициенты $\beta 1=...=\beta 11=1/26$. На рис. 5 приведена регрессия процентного ранга по погрешностям Pu на процентный ранг по вибропараметрам Pv. Там же указано значение коэффициента ранговой корреляции ρ_S, подсчитанного для n=6 по формуле (9), и приведены границы разброса (пунктир), определенные по (5), для доверительной вероятности Q=0,95. Высокое значение коэффициента ρ_S = 0,94 (>0,77 - граничное значение для α=0,05) свидетельствует о достаточно полном совпадении качества насоса, характеризуемого рангом по вибропараметрам с истинным качеством, характеризуемым рангом по погрешностям.

Согласно ранее выдвинутому положению о том, что насос, имеющий меньшие погрешности изготовления, обладает более высоким качеством, которое должно проявляться в виде увеличения его надежности и долговечности, ряд насосов, отобранных на контрольно-сдаточных испытаниях, был поставлен на ускоренные испытания. Насосы испытывались до разрушения подшипников. Результаты этого эксперимента - регрессия ресурса на комплексный виброакустический показатель качества насоса - приведены на рис. 6. Средняя наработка насосов с малой виброактивностью (Pv < 0,3) Тм=1180 ч, а с большой (Pv > 0,9) Тб=350 ч, то есть в три с лишним раза меньше. Коэффициент ранговой корреляции Спирмена ρ_S = - 0,75 и значим на 5%-ном уровне.

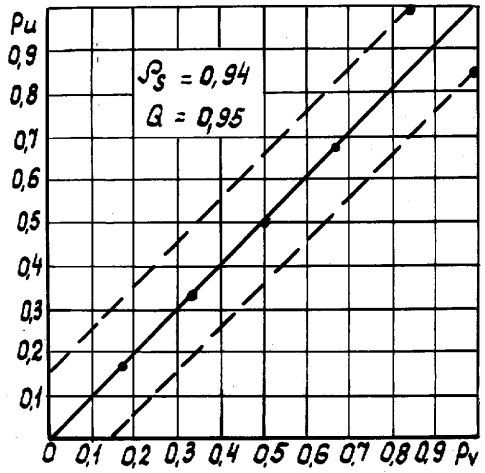

Рис.5

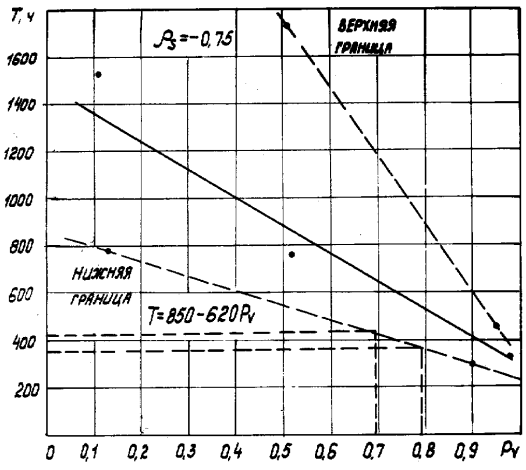

Рис.6

Результаты данного эксперимента подтверждают наличие значимой связи между качеством насоса, которое характеризуется виброакустическим показателем качества Pv и его ресурсом T.

Ранговые системы безэталонной адаптивной диагностики и мониторинга комплексов оборудования обеспечивают быстрое внедрение за счет резкого снижения времени необходимого на адаптацию к диагностируемому оборудованию и повышение рентабельности предприятий всех отраслей народного хозяйства на основе ресурсосберегающей безопасности [6] путем снижения аварий, ремонтов и потерь при переводе оборудования на эксплуатацию по фактическому техническому состоянию.

Выводы:

1. Разработана модель рангового метода безэталонной диагностики объектов, устанавливающая линейную регрессионную связь между функциями распределения

диагностических признаков и структурных погрешностей, совпадающую с биссектрисой первого координатного угла информационной плоскости.

2. Получена оценка ошибки диагностики, обусловленной стохастической связью диагностических признаков со структурными параметрами, которая обратно пропорциональна коэффициенту ранговой корреляции Спирмена между ними.

3. Предложено оценивать и прогнозировать качество машины через ее обобщенную погрешность, которую определяют как процентный ранг средневзвешенной суммы функций распределения частных погрешностей.

4. Разработана модель комплексной оценки качества машин, в которой комплексный показатель качества вычисляется как процентный ранг средневзвешенной суммы функций распределения диагностических признаков (вибропараметров) и является несмещенной и состоятельной оценкой обобщенной погрешности насоса.

5. Разработаны способы диагностики и прогнозирования, программно-аппаратные средства и методической обеспечение самообучающихся ранговых процедур безэталонной вибродиагностики машин на приемосдаточных испытаниях.

6. Экспериментально подтверждено наличие нелинейной стохастической связи между структурными параметрами машины, погрешностями ее деталей и погрешностями их сборки в машине, с диагностическими признаками виброакустического сигнала.

7. Показано, что связь между рангами погрешностей и вибропараметрами является линейной. Коэффициент ранговой корреляции Спирмена между процентными рангами по погрешностям и вибропараметрами равен 0,94. Это позволяет считать процентный ранг по вибропараметрам достаточно полной характеристикой обобщенной погрешности машины и использовать его как комплексный показатель ее качества в серийном производстве.

8. Подтверждена возможность прогнозирования ресурса машин по величине комплексного виброакустического показателя качества, определяемого на приемосдаточных испытаниях.

Литература

1 Костюков В.Н. Мониторинг безопасности производства. М.: Машиностроение, 2002.-224 С.

2 Костюков В.Н. Ранговый метод виброакустической диагностики и оценки качества машин // Гидропривод и системы управления строительных, тяговых и дорожных машин. Омск, 1986, с. 113 – 124.

3 А.С. СССР № 1359692, кл. G 01M 7/00. Способ диагностики машин и устройство для его осуществления / Костюков В.Н., Морозов С.А., Гетманская Г.А. Заявл. 30.03.84; Опубл. 15.12.87; Бюл.- № 46.

4 Патент РФ № 1647323, кл. G 01M 7/00. Устройство для диагностики машин / Костюков В.Н. Заявл. 05.12.88; Опубл. 22.11.94; Бюл.- № 17.

5 Патент РФ 1519350, МКИ G01M15/00. Способ диагностики и прогнозирования технического состояния машин / В.Н. Костюков (РФ); Заявл. 30.06.87; Опубл. 22.11.94; Бюл.- № 40.

6 Костюков В.Н., Бойченко С.Н., Костюков А.В. Автоматизированные системы управления безопасной ресурсосберегающей эксплуатацией оборудования нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств (АСУ БЭР - КОМПАКС). Под ред. В.Н. Костюкова. М.: Машиностроение, 1999, 163 с.