

# ***Технология и синтез решающих правил вибродиагностики роторных машин***

Выполнил студент группы 2 – 33м

Белов А.А

Руководитель: доц., к. т. н.

Колобов А.Б.

# Цель работы

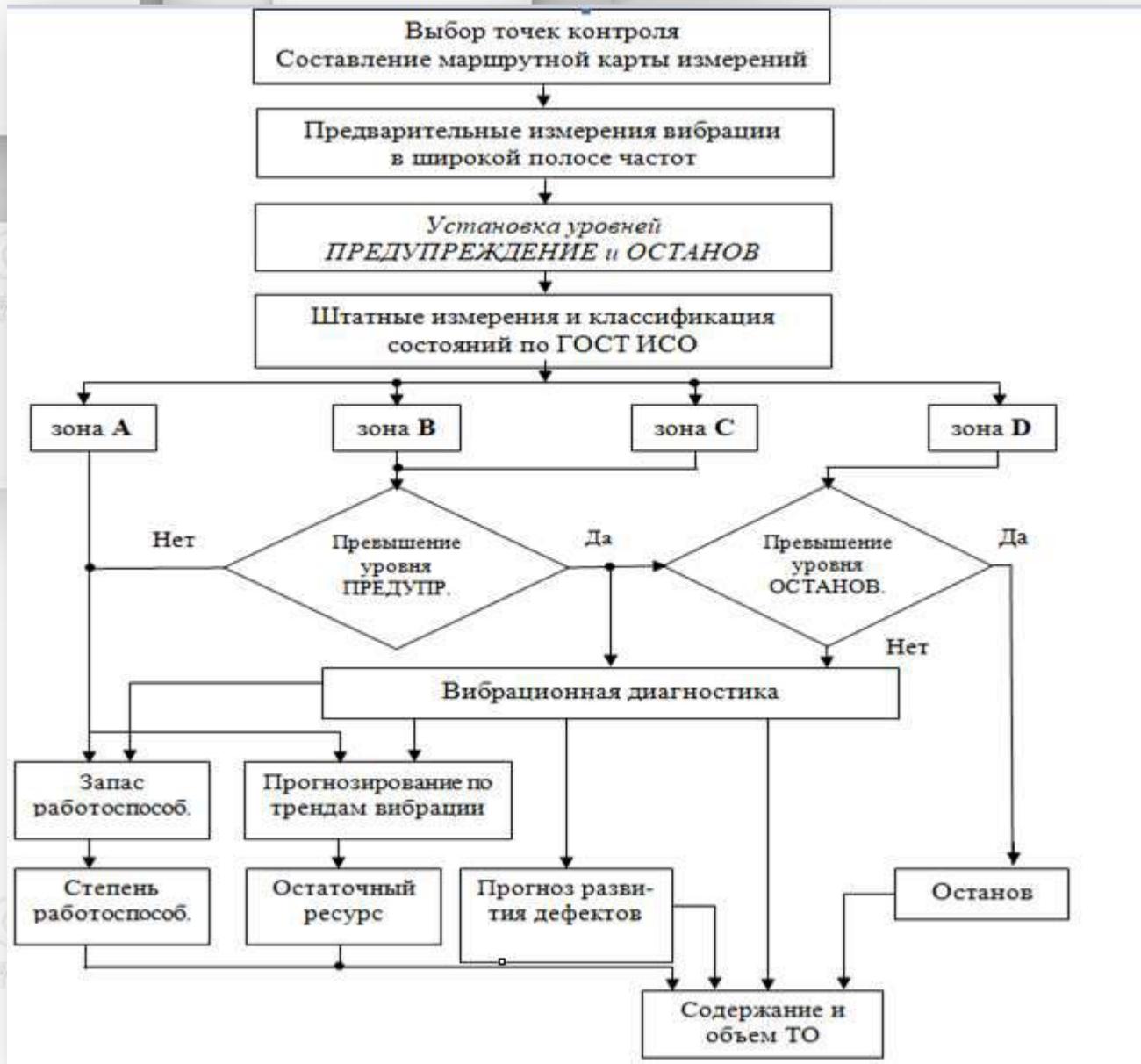
## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

**Целью работы** являлась разработка методических, технических и организационных решений, дополняющих концепцию оценки технического состояния и имеющих практическое приложение при выполнении вибромониторинга роторных промышленных машин.

Апробация предлагаемых решений производилась применительно к электромеханическим центробежным роторным машинам газовой котельной ФГБОУ ИГЭУ, в частности, сетевые водяные насосы.

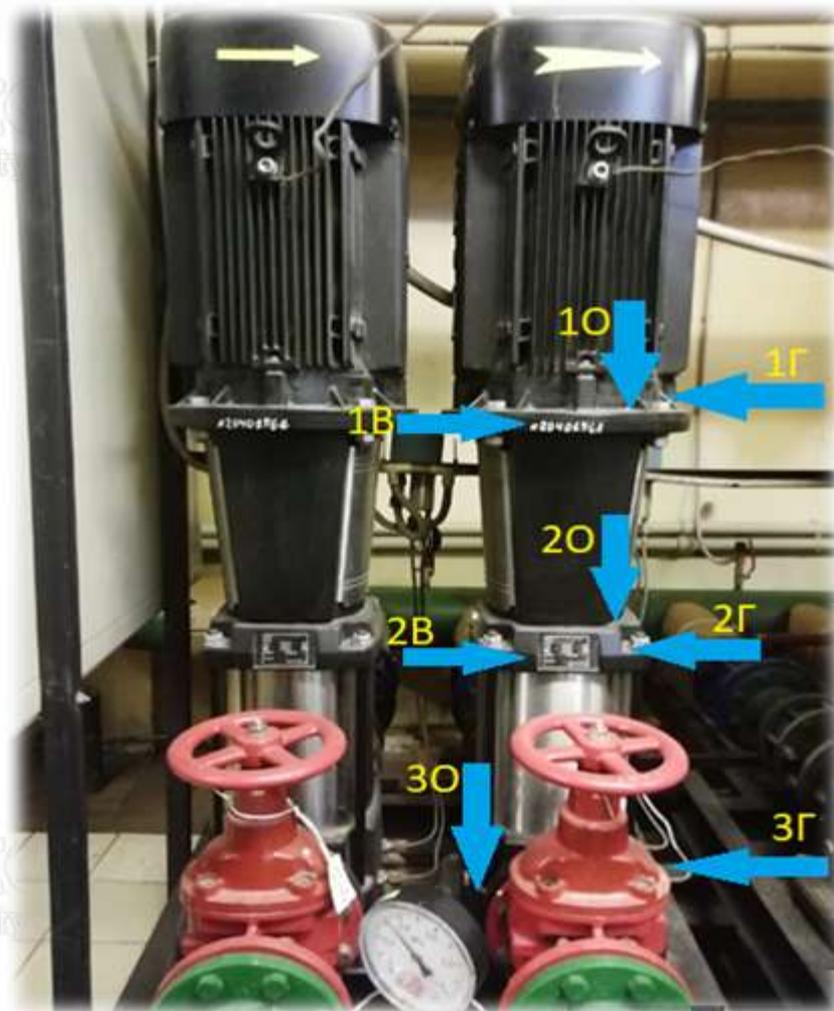
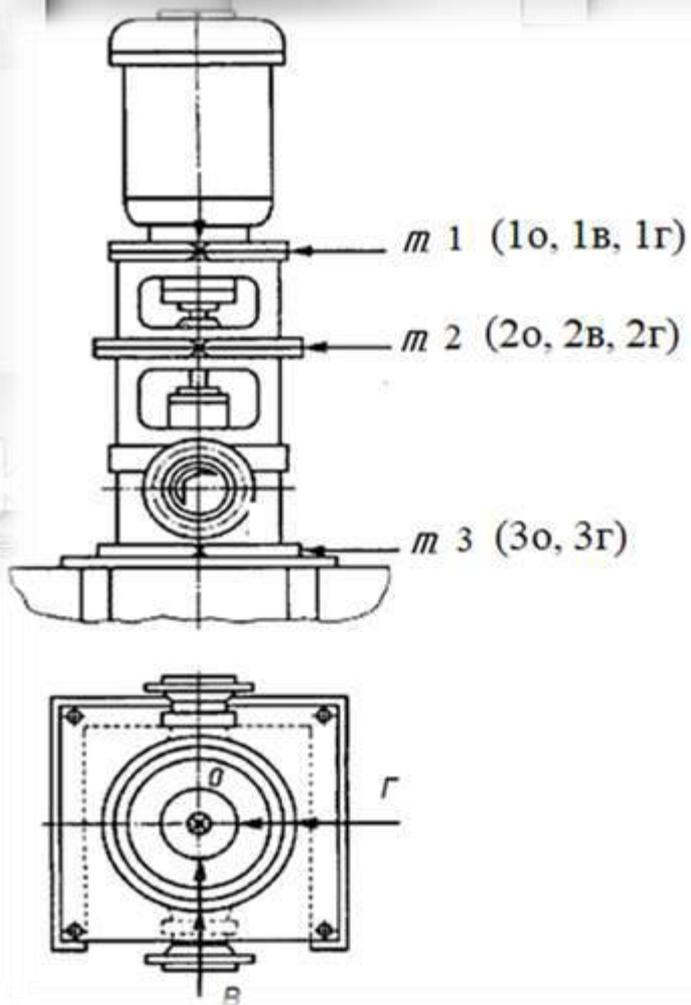
Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- ✓ разработать структуру выполнения вибромониторинга центробежных роторных машин на основе предлагаемой нормативными документами РФ концепции оценки технического состояния;
- ✓ разработать технологию установления ограничительных уровней ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ и ОСТАНОВ, дополняющую положения ГОСТ и позволяющую учитывать статистическую неоднородность вибрации;
- ✓ синтезировать с использованием статистических методов методику выбора индивидуальных границ зон технических состояний и установления на их основе ограничительных уровней, учитывающую режимные факторы работы;
- ✓ произвести оценку корректности и значимости расчетных индивидуальных границ зон состояний по предложенной технологии с использованием метода статистических решений.



*Блок-схема вибрационного контроля состояния машин*

# Внешний вид насоса сетевой воды





# Основные расчетные выражения

- оценка среднего значения СКЗ виброскорости  $\bar{V}_{e0j}$  (оценка базового уровня)

$$\bar{V}_{e0j} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_{eji} \quad (1)$$

- оценка среднего квадратичного отклонения (СКО) СКЗ виброскорости от базового уровня

$$\bar{S}_{V_{e0j}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_{eji} - \bar{V}_{e0j})^2}{n-1}} \quad (2)$$

Поскольку число измерений вибрации  $n$  не превышает ( $n \geq 20$ ), то среднее значение СКЗ виброскорости и СКО СКЗ виброскорости, рассчитанные по (1) и (2) будут смещёнными и несостоятельными оценками.

Истинное значение базового уровня (среднего  $V_{e0j}$ ) будет находиться в пределах доверительного интервала, установленного для заданной доверительной вероятности  $P$ :

$$V_{e0j} = \bar{V}_{e0j} \pm t \cdot S_{V_{e0j}} \quad (3)$$

где  $t$  – коэффициент доверительной вероятности для заданной  $P$  и числа измерений  $n$ ;  $S_{V_{e0j}}$  – СКО оценки среднего значения СКЗ виброскорости (базового уровня), которая определяется

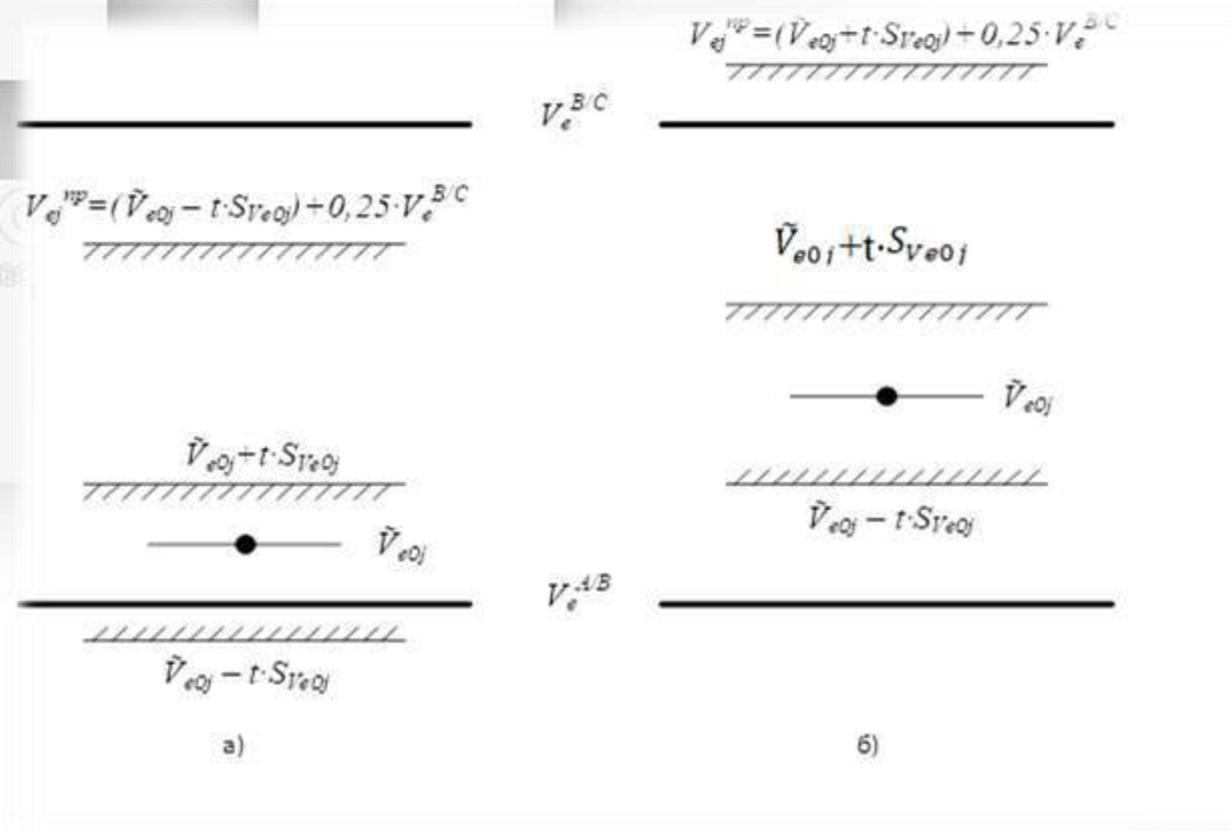
$$S_{V_{e0j}} = \frac{\bar{S}_{V_{e0j}}}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

Если расчетная по (1) оценка  $\bar{V}_{e0j}$  близка к границе  $V_e^{A/B}$ , т.е.  $\bar{V}_{e0j} \leq 1,25 V_e^{A/B}$ , то уровень ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ устанавливается по нижней границе доверительного интервала (3) по выражению

$$V_{e_j}^{pp} = (\bar{V}_{e0j} - t \cdot S_{V_{e0j}}) + 0,25 \cdot V_e^{B/C} \quad (5)$$

Если расчетная по (1) оценка  $V_{e0j} > 1,25 \cdot V_e^{A/B}$ , то уровень ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ устанавливается по верхней границе доверительного интервала (3) по выражению

$$V_{e_j}^{pp} = (\bar{V}_{e0j} + t \cdot S_{V_{e0j}}) + 0,25 \cdot V_e^{B/C} \quad (6)$$



Принцип выбора уровня ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ:

а – при значении оценки среднего значения СКЗ близком к границе зон **A/B**;

б – при значении оценки среднего значения СКЗ превышающем более чем на 25%

границу зон **A/B**

# На примере насоса 1 рассмотрим расчет уровней

Точка	Направление	Оценки базового уровня, мм/с			Границы доверительного интервала, мм/с		Уровень ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ, мм/с
		$\tilde{V}_{e0j}$	$\tilde{S}_{Ve0j}$	$S_{ve0j}$	Нижняя	Верхняя	
1	в	1,45	0,131	0,046	1,341	1,559	2,041
	г	2,112	0,391	0,138	1,786	2,439	3,14 → 3,5
	о	1,5	0,076	0,027	1,437	1,563	2,137
2	в	1,025	0,104	0,037	0,939	1,111	1,639
	г	1,212	0,099	0,035	1,13	1,295	1,83
	о	0,738	0,052	0,018	0,649	0,781	1,39 → 1,4
3	г	1,162	0,052	0,018	1,119	1,206	1,819
	в	0,713	0,113	0,04	0,619	0,806	1,32 → 1,4

Примечание:  $P = 0,95$ ;  $n = 8$ ;  $t = 2,36$

Стрелка обозначает, что принимается значение равное:

$$V_{ej}^{np} = 1,25 \cdot V_{eB/C} = 1,25 \cdot 2,8 = 3,5 \frac{\text{мм}}{\text{с}} \text{ или } V_{ej}^{np} = V_{eA/B} = 1,4 \text{ мм/с}$$

# Результаты расчёта индивидуальных уровней границ зон А/В, В/С и С/Д для сетевого насоса 1 (СН-1)

Исходная выборка	СКЗ виброскорости $V_{ei,3}$ мм/с							
	Контрольные точки/Направления измерения							
	1			2			3	
	в	г	о	в	г	о	г	о
1	1,5	2,4	1,5	<b>1,2</b>	1,2	<b>0,8</b>	1,1	0,8
2	1,4	2,3	1,4	1	1,3	<b>0,8</b>	1,2	0,8
3	1,3	2,4	1,5	0,9	<b>1,4</b>	0,7	1,2	0,7
4	1,5	2,4	<b>1,6</b>	0,9	1,2	0,7	1,2	0,6
5	<b>1,7</b>	2,3	1,5	1	1,2	0,7	1,1	0,6
6	1,5	2,1	<b>1,6</b>	1	1,1	0,7	1,1	0,6
7	1,3	1,5	1,5	1,1	1,1	<b>0,8</b>	1,2	<b>0,9</b>
8	1,4	1,5	1,4	1,1	1,2	0,7	1,2	0,7
<b>Расчётные параметры</b>								
Оценка среднего значения СКЗ ( $\tilde{V}_{e0j}$ )	1,45	2,11	1,5	1,03	1,21	0,74	1,16	0,71
Оценка СКО среднего значения СКЗ ( $\tilde{S}_{V_{e0j}}$ )	0,131	0,391	0,076	0,104	0,099	0,052	0,052	0,113
СКО оценки среднего значения СКЗ ( $S_{V_{e0j}}$ )	0,046	0,138	0,027	0,037	0,035	0,018	0,018	0,04
Предельное значение $\tilde{V}_{e_{maxj}}$	1,589	2,527	1,58	1,135	1,318	0,792	1,217	0,832
Граница А/В ( $\tilde{V}_{e0j}$ )	1,45	<b>2,11</b>	1,5	1,03	1,21	0,74	1,16	0,71
Граница В/С ( $1,6\tilde{V}_{e0j}$ )	2,32	<b>3,379</b>	2,4	1,64	1,94	1,18	1,86	1,14
Граница С/Д ( $2,56\tilde{V}_{e0j}$ )	3,71	<b>5,41</b>	3,84	2,62	3,1	1,89	2,98	1,83

# Рекомендуемые индивидуальные уровни границ зон А/В, В/С и С/Д для сетевых насосов СН-1 – СН-4

Граница зон состояний механизмов		СКЗ виброскорости, мм/с							
		Контрольные точки/Направления измерения							
		1			2			3	
		в	г	о	в	г	о	г	о
Сетевой насос 1 (СН1)	А/В	1,4	1,4	1,4	0,71	1,12	0,71	1,12	0,71
	В/С	2,3	2,8	2,3	1,4	1,8	1,12	1,8	1,12
	С/Д	3,5	4,5	3,5	2,3	2,8	1,8	2,8	1,8
Сетевой насос 2 (СН2)	А/В	1,4	1,4	1,4	1,12	1,4	1,12	1,12	1,12
	В/С	2,8	2,8	2,8	1,8	2,3	1,8	1,8	1,8
	С/Д	4,5	4,5	4,5	2,8	3,5	2,8	2,8	2,8
Сетевой насос 3 (СН3)	А/В	1,4	1,4	1,4	1,12	1,4	1,12	0,71	1,12
	В/С	2,8	2,8	2,3	1,8	2,3	1,8	1,4	1,8
	С/Д	4,5	4,5	3,5	2,8	3,5	2,8	2,3	2,8
Сетевой насос 4 (СН4)	А/В	1,4	1,4	1,12	1,12	1,12	1,12	0,71	0,71
	В/С	2,3	2,3	1,8	1,8	1,8	1,8	1,4	1,4
	С/Д	3,5	3,5	2,8	2,8	2,8	2,8	2,3	2,3

# Уровни ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ и ОСТАНОВ для сетевого насоса 1 (СН-1) без учета и с учетом индивидуальных границ зон состояний

Точка	Направление	Уровень ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ, мм/с		Уровень ОСТАНОВ с учетом индивидуальных границ зон состояний, мм/с	
		Без учета индивидуальных границ зон состояний	С учетом индивидуальных границ зон состояний	Мягкий	Жесткий
1	в	2,041	1,92	3,15	4,38
	г	3,5	3,14 → 3,5	4,05	5,63
	о	2,137	1,966	3,15	4,38
2	в	1,639	1,469	2,07	2,875
	г	1,83	1,579	2,52	3,5
	о	1,4	0,976	1,62	2,25
3	г	1,819	1,57	2,52	3,5
	о	1,4	0,899	1,62	2,25

Стрелка обозначает, что принимается значение равное:

$$V_{ej}^{np} = 1,25 \cdot V_e^{B/C} = 1,25 \cdot 2,8 = 3,5 \frac{mm}{c}$$

# Соотношение уровней ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ для контрольных точек сетевых насосов

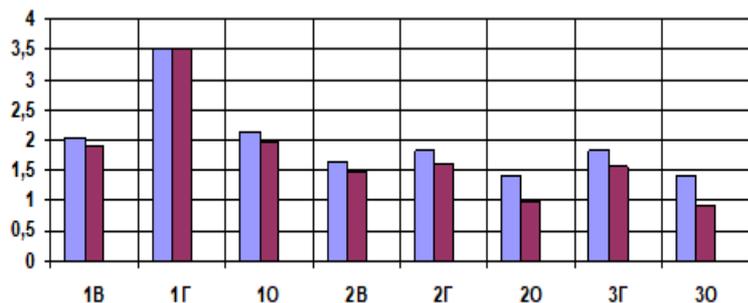


Рисунок 6.1 – Соотношение уровней ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ для контрольных точек сетевого насоса СН-1

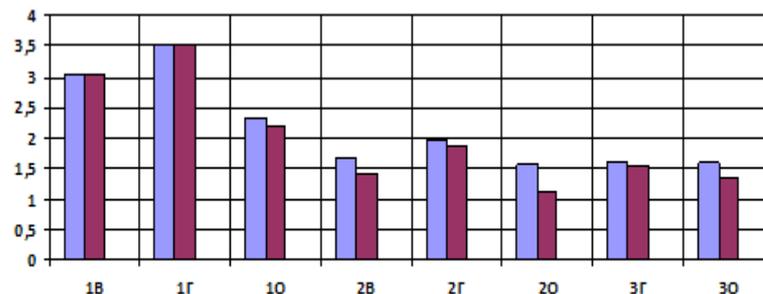


Рисунок 6.3 – Соотношение уровней ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ для контрольных точек сетевого насоса СН-3

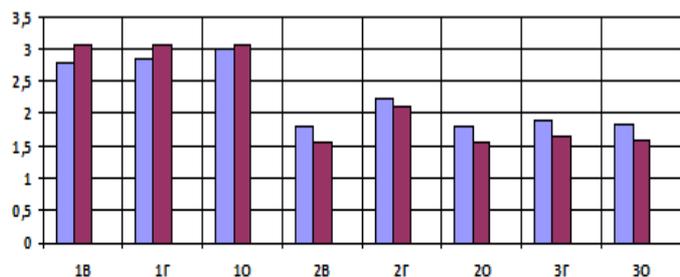


Рисунок 6.2 – Соотношение уровней ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ для контрольных точек сетевого насоса СН-2

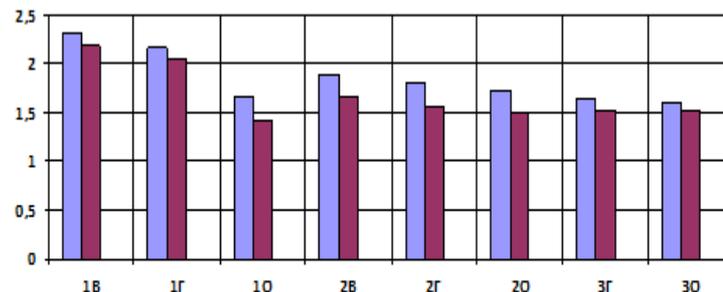


Рисунок 6.4 – Соотношение уровней ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ для контрольных точек сетевого насоса СН-4

# КХР вибрации сетевых насосов

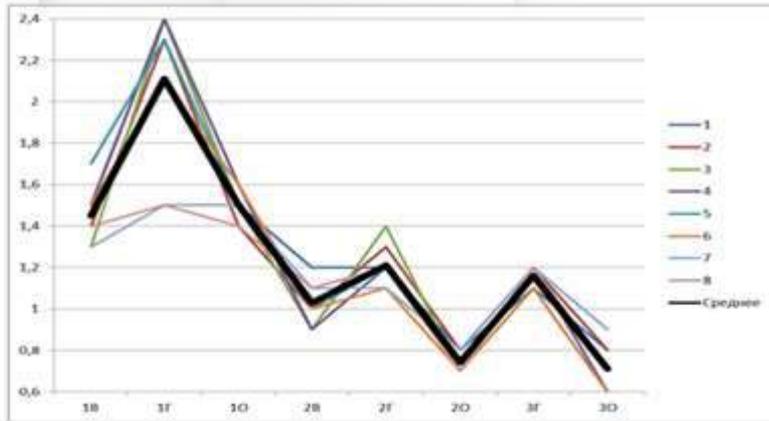


Рисунок 7.1 – КХР вибрации по результатам измерения и усредненная КХР (эталонная маска) сетевого насоса СН-1

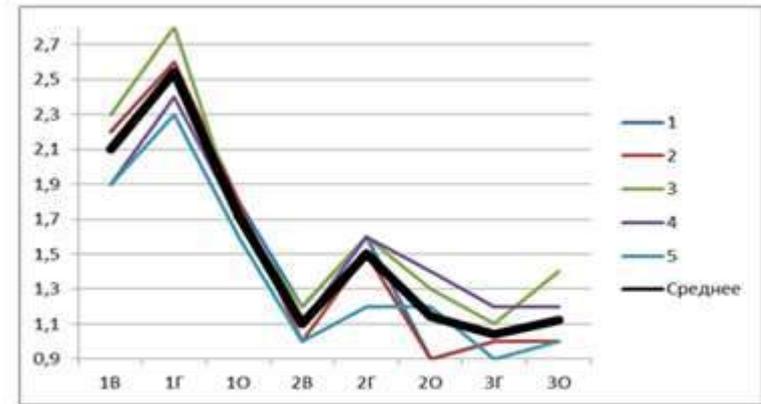


Рисунок 7.3 – КХР вибрации по результатам измерения и усредненная КХР (эталонная маска) сетевого насоса СН-3

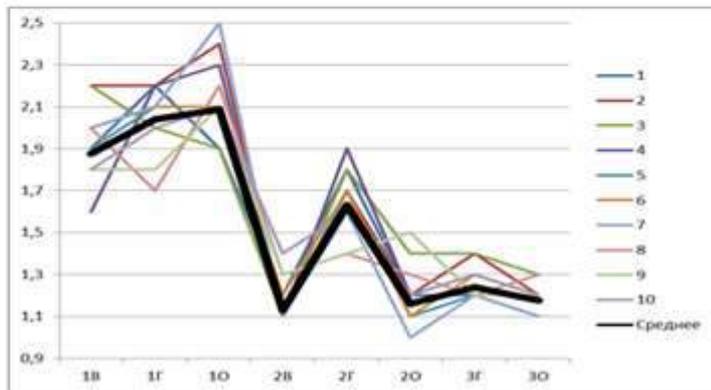


Рисунок 7.2 – КХР вибрации по результатам измерения и усредненная КХР (эталонная маска) сетевого насоса СН-2

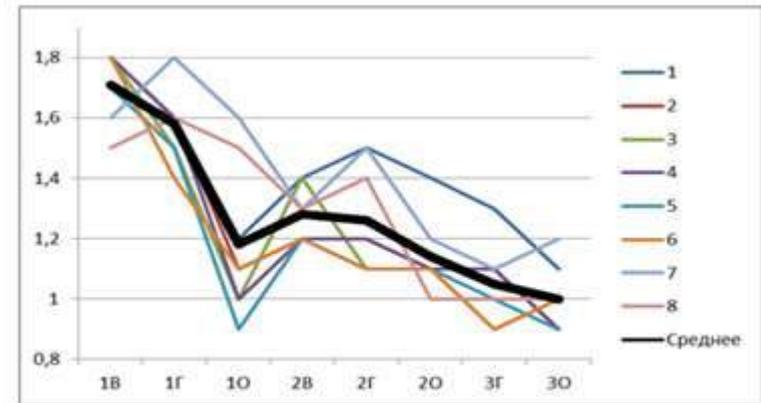


Рисунок 7.4 – КХР вибрации по результатам измерения и усредненная КХР (эталонная маска) сетевого насоса СН-4

# Эталонные маски (усредненные КХР вибрации) сетевых насосов СН-1 – СН-4

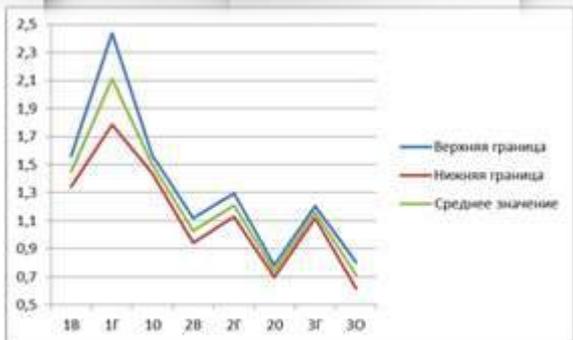


Рисунок 8.1 – эталонная маска (усредненная КХР вибрации) сетевого насоса СН-1 с границами доверительных интервалов

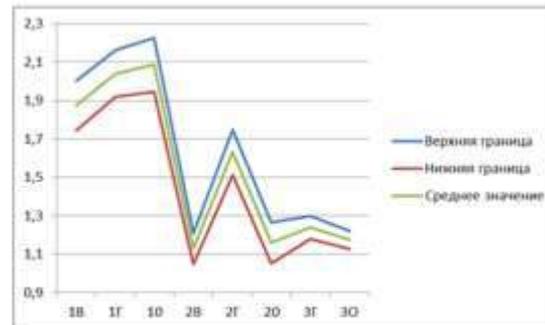


Рисунок 8.2 – эталонная маска (усредненная КХР вибрации) сетевого насоса СН-2 с границами доверительных интервалов

- верхняя граница

$$V_{e0j} = \tilde{V}_{e0j} + t \cdot S_{V_{e0j}}$$

- нижняя граница

$$V_{e0j} = \tilde{V}_{e0j} - t \cdot S_{V_{e0j}}$$

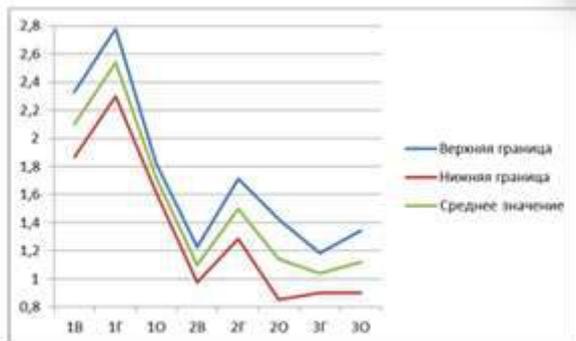


Рисунок 8.3 – эталонная маска (усредненная КХР вибрации) сетевого насоса СН-3 с границами доверительных интервалов

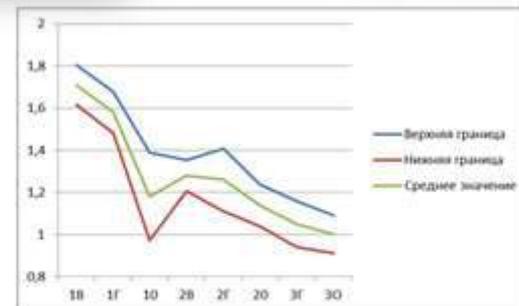


Рисунок 8.4 – эталонная маска (усредненная КХР вибрации) сетевого насоса СН-4 с границами доверительных интервалов

# Величины СКО значений СКЗ виброскорости в точках измерения сетевых насосов

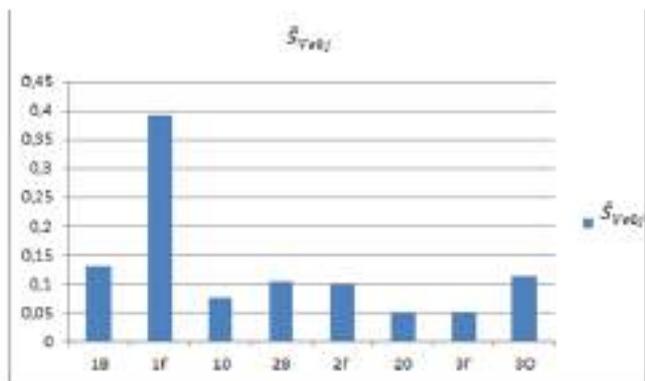


Рисунок 9.1 – величины СКО значений СКЗ виброскорости в точках измерения сетевого насоса СН-1

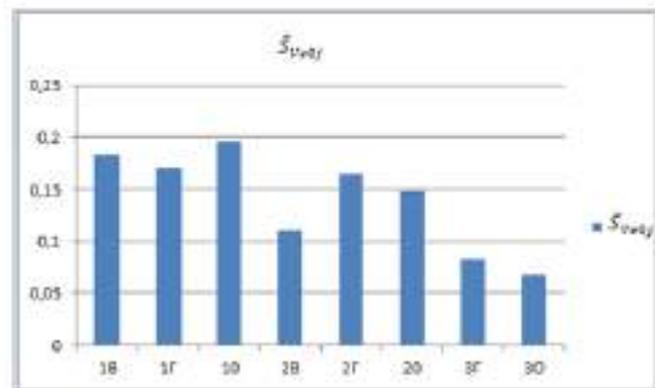


Рисунок 9.2 – величины СКО значений СКЗ виброскорости в точках измерения сетевого насоса СН-2

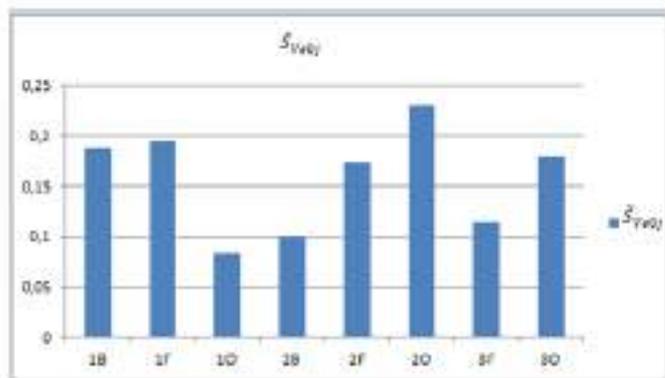


Рисунок 9.3 – величины СКО значений СКЗ виброскорости в точках измерения сетевого насоса СН-3

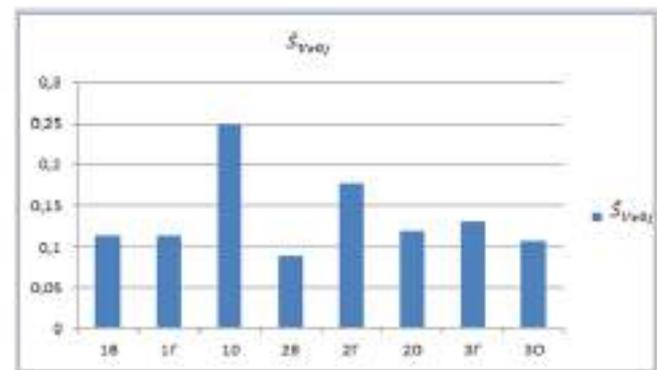
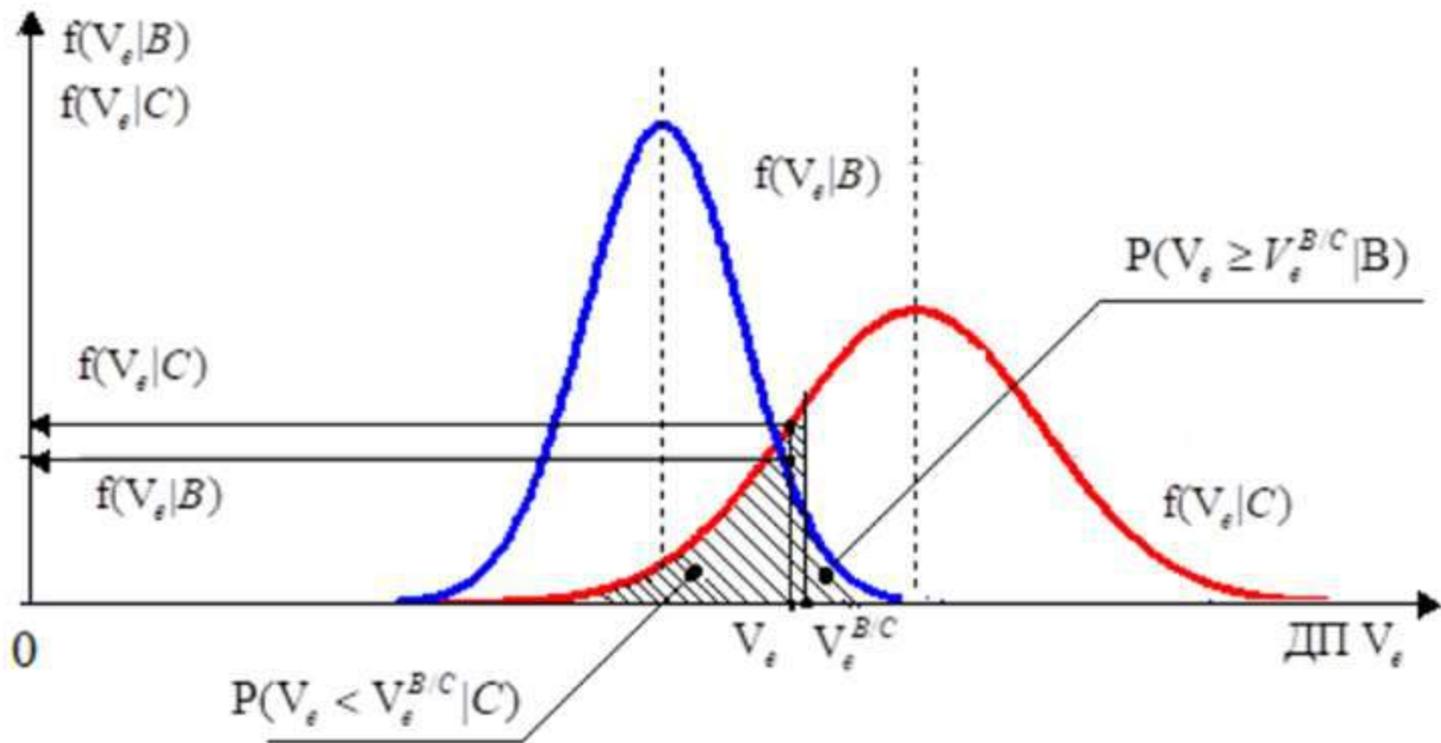


Рисунок 9.4 – величины СКО значений СКЗ виброскорости в точках измерения сетевого насоса СН-4

**Плотности распределения вибрации в  
состояния В и С  
при нормальном законе распределения**



# Основные положения метода статистических решений

целевая функция среднего риска ошибочного решения

$$R = C_{12} \cdot P(D_{12}) + C_{21} \cdot P(D_{21}).$$

Решение о выборе величины границы  $V_e^{B,C}$  принимается из условия минимума среднего риска, которое имеет вид

$$\frac{f(V_e^{B,C}|B)}{f(V_e^{B,C}|C)} = \frac{C_{12}P(C)}{C_{21}P(B)},$$

а левая часть называется *отношением правдоподобия*.

Синтез решающего правила выбора границы  $V_e^{B,C}$ , которая понижена, относительно ГОСТ, предполагает минимизацию риска ошибки при определении состояния В, т.е. при измеренной величине  $V_e < V_e^{B,C}$ , с минимальным риском ошибиться, можно утверждать, что объект, имеющий на момент измерения СКЗ виброскорости  $V_e$ , находится в зоне В. Данное условие

$$\frac{f(V_e^{B,C}|B)}{f(V_e^{B,C}|C)} > \frac{C_{12}P(C)}{C_{21}P(B)},$$

является решающим правилом в методе минимального риска

$$P(D_{21}) = P(B) - P(V_e \geq V_e^{B,C}|B), \quad (2.4)$$

где  $P(B)$  – априорная вероятность нахождения машины в состоянии **В**, определяемая на основе статистических данных;  $P(V_e \geq V_e^{B,C}|B)$  – вероятность нахождения машины в состоянии **В** при  $V_e \geq V_e^{B,C}$  (соответствует площади под кривой плотности распределения  $f(V_e|B)$  правее  $V_e^{B,C}$  (рис. 2.12).

$$P(V_e \geq V_e^{B,C}|B) = \int_{V_e^{B,C}}^{\infty} f(V_e|B)dV_e. \quad (2.5)$$

Аналогично определяется вероятность «пропуска дефекта»:

$$P(D_{22}) = P(C) \cdot P(V_e < V_e^{B,C}|C) = P(C) \cdot \int_0^{V_e^{B,C}} f(V_e|C)dV_e, \quad (2.6)$$

где  $P(C)$  – априорная вероятность нахождения машины в состоянии **С**;  $P(V_e < V_e^{B,C}|C)$  – вероятность нахождения машины в состоянии **С** при  $V_e < V_e^{B,C}$  (площадь под кривой плотности распределения  $f(V_e|C)$  левее  $V_e^{B,C}$  (рис. 10).

$$P(V_e < V_e^{B,C}|C) = \int_0^{V_e^{B,C}} f(V_e|C)dV_e. \quad (2.7)$$

Для выбора граничного значения  $V_e^{B,C}$  могут быть использованы различные методы оптимизации целевой функции среднего риска (2.3). В работе использован метод минимального риска, в котором решение о выборе величины  $V_e^{B,C}$  принимается из условия минимума среднего риска.

Дифференцируя функцию среднего риска (2.3) по  $V_e^{B,C}$  и приравнявая производную к нулю, получаем

$$\frac{dR}{dV_e^{B,C}} = -C_{21}P(B)f(V_e^{B,C}|B) + C_{12}P(C)f(V_e^{B,C}|C) = 0, \quad (2.8)$$

что можно записать в виде:

$$C_{21}P(B)f(V_e^{B,C}|B) = C_{12}P(C)f(V_e^{B,C}|C). \quad (2.9)$$

После группировки (2.9) получаем *условие минимума среднего риска*:

$$\frac{f(V_e^{B,C}|B)}{f(V_e^{B,C}|C)} = \frac{C_{12}P(C)}{C_{21}P(B)}$$

# Изменение величины отношения правдоподобия при различных соотношениях цен ошибок $C_{12}/C_{21}$

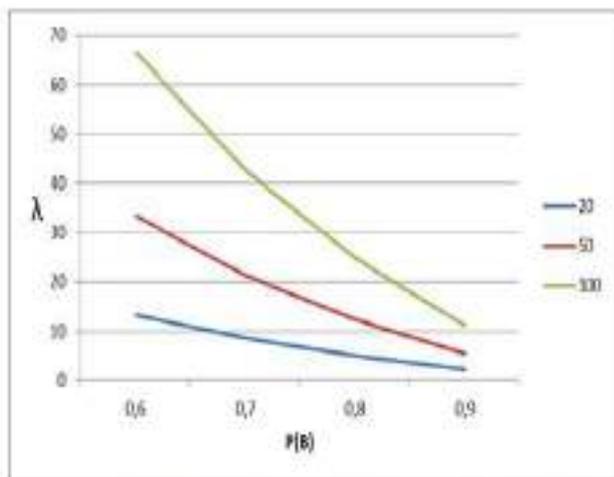


Рис. 13. Изменение величины отношения правдоподобия при соотношениях цен ошибок  $C_{12}/C_{21}$ :  
1 -  $C_{12}/C_{21} = 20$ , 2 -  $C_{12}/C_{21} = 50$ , 3 -  $C_{12}/C_{21} = 100$

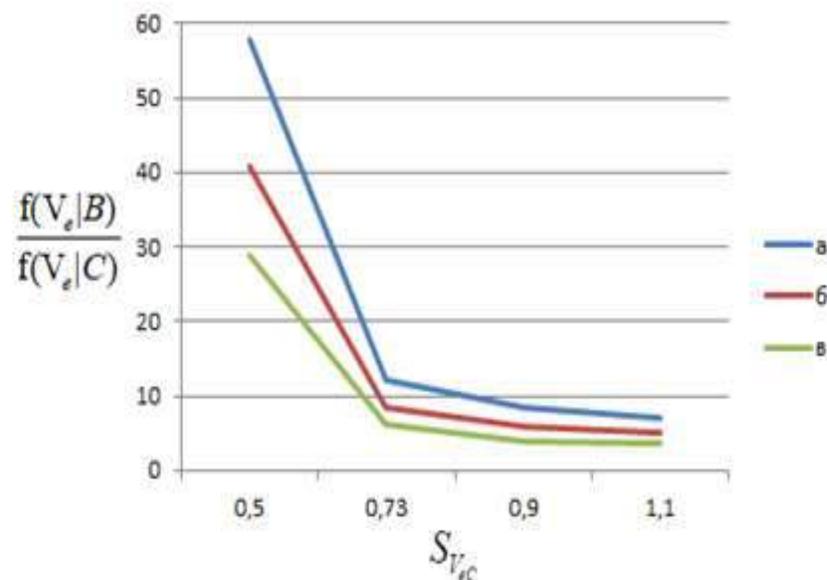


Рис. 14. Изменение отношения правдоподобия при различных вариациях СКЗ виброскорости в пределах зон состояний **B** и **C**:  
а - при  $S_{V_{vc}} = 0,21$  мм/с; б - при  $S_{V_{vc}} = 0,42$  мм/с; в - при  $S_{V_{vc}} = 0,63$  мм/с

# Заключение

- ❑ В ходе работы разработаны методические, технические и организационные решения, дополняющие концепцию оценки технического состояния и имеющие практическое приложение при выполнении вибромониторинга роторных промышленных машин.
- ❑ Апробация предлагаемых решений производилась применительно к электромеханическим центробежным роторным машинам газовой котельной ФГБОУ ИГЭУ, в частности, сетевые водяные насосы.
- ❑ Решены следующие задачи:
  - ✓ разработана структура выполнения вибромониторинга центробежных роторных машин на основе нормативных документов;
  - ✓ разработана с использованием статистических моделей технология установки ограничительных уровней ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ и ОСТАНОВ, как дополнение к методам ГОСТ ИСО 10816-1(3), и рассчитаны данные уровни для каждой контролируемой машины;
  - ✓ синтезирована с использованием статистических моделей методика установки индивидуальных уровней границ зон состояний, которая может быть использована наряду с ГОСТ ИСО 10816-1(3) и установлены ограничительные уровни ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ и ОСТАНОВ на основе индивидуальных уровней границ зон состояний для практического применения при эксплуатации сетевых насосов;
  - ✓ произведена оценка корректности и значимости расчетных границ индивидуальных уровней состояния, по предложенной технологии, с использованием метода статистических решений и подтверждена эффективность их использования относительно границ, устанавливаемых по ГОСТ.
- ❑ Разработанная технология установки ограничительного уровня ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ и выбора индивидуальных границ зон состояний могут рекомендоваться для вибромониторинга, в частности, механизмов собственных нужд котло-турбинных цехов ТЭЦ Владимирского филиала ПАО «Т Плюс» и других генерирующих компаний РФ.