

Фактическая статистика декрементов колебаний оборудования АЭС,
Г.В.Встовский, П.С.Казновский, А.П.Казновский,

ОАО «ВНИИАМ» занимается исследованиями сейсмостойкости оборудования АЭС с 1979 г. на основе оригинального экспериментально-расчетного метода [1,2]. К настоящему времени выполнены обследования более 30 блоков 11-ти АЭС России, Украины, Армении, Болгарии, Венгрии и Словакии. Проверено более 300 типов и более 3000 единиц технологического оборудования различного назначения, в том числе: теплообменники, системы и оборудование химводоподготовки, маслоочистки и газоочистки, насосы, трубопроводная арматура (вентили, клапаны, задвижки), баки, резервуары, баллоны; вентагрегаты, кондиционеры, дизельные генераторы, грузоподъемные и транспортные механизмы, трансформаторы, электроаккумуляторные сборки, электроизмерительные панели и сборки, холодильные машины, опорные рамы и другие несущие конструкции. Методика обследования получила официальное одобрение со стороны надзорных органов России и МАГАТЭ.

Данная работа посвящена статистическому анализу части полученных результатов - собственных частот и декрементов колебаний оборудования Ростовской, Ленинградской, Калининской АЭС и нескольких типов электротехнического оборудования, см. Приложения 1,2, с целью выявления статистических закономерностей, присущих характеристикам собственных колебаний оборудования в условиях его фактического состояния, т.е. в реальных условиях монтажа, раскрепления и обвязки. Необходимость такого анализ продиктована, во-первых, тем, что данные характеристики используются для установления инерциальных сейсмических нагрузок по линейно-спектральному методу (ЛСМ), который наиболее часто используется при оценках сейсмостойкости [3], см. рис.1, и во-вторых, тем, что практические значения относительных декрементов колебаний (коэффициентов затухания) достаточно часто оказываются ниже 2% - наименьшей величины, для которой устанавливаются нормативные инерциальные нагрузки для большинства типов оборудования (за исключением некоторых специальных норм, например, "Требования к устройству и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов для объектов использования атомной энергии" НП-043-03, не общего применения). По этим причинам используемые расчетные значения инерциальных нагрузок оказываются меньше значений, диктуемых ЛСМ. Приводимые ниже результаты свидетельствуют о значительной доле оборудования с декрементами меньше 2% и резонансными частотами в диапазоне от

0 до 10 Гц – критическом диапазоне частот, в котором находятся частоты возмущающих колебаний при землетрясениях.

Анализировались декременты и собственные (резонансные) частоты колебаний вдоль трех различных осей 426-ти единиц оборудования различного назначения. Для удобства детального анализа все оборудование было разбито на типы, см. Приложение 2, для всех единиц оборудования: ось Z всегда направлена вертикально вверх, ось X вдоль оси симметрии, ось Y, соответственно, нормально оси X, кроме случаев G и E, когда ось симметрии – вертикальная ось Z. В Приложении 3 приводится статистика значений декрементов низко- и высокочастотных колебаний оборудования.

На рис.2 представлено распределение собственных частот всех типов оборудования во всех направлениях. Доля частот в критическом диапазоне 0-10 Гц составляет 47,8%, что подтверждает высказанные выше соображения о необходимости детального статистического анализа декрементов.

Необходимо отметить, что набор анализируемых значений декрементов получен спектральным методом, который состоит в вычислении декремента по ширине соответствующей резонансной линии Фурье спектров мощности экспериментальных акселерограмм:

$$\delta_w = \frac{w}{2\nu_{\max}} \quad (1)$$

где w – ширина линии на 0,707 высоты пика, ν_{\max} – резонансная частота, δ_w – соответствующий относительный декремент колебаний на этой частоте. В работе [4] было показано, что этот метод неприменим для определения малых декрементов порядка 1% на резонансных частотах менее 10 Гц, т.к. дает завышенные значения. В работах [4,5] были предложены методы обработки акселерограмм для расчета истинных значений декрементов на низких частотах. В данной работе предлагается по данным работы [4], см. рис.3а, функциональную связь величины декремента δ_w с истинным значением δ аппроксимировать формулой

$$\delta = \sqrt{\delta_w^2 - \delta_0^2}, \quad \delta_0 = \frac{0,45}{T\nu_{\max}}, \quad (2)$$

где T – длина акселерограммы в секундах. Это дает возможность внести в статистический анализ результатов расчета декрементов по формуле (1) поправку для компенсации завышения декрементов.

С другой стороны, неразрушающий метод получения акселерограмм основан на использовании достаточно малых возмущений, возбуждающих колебания малых амплитуд, декременты которых могут сильно отличаться от декрементов колебаний, возможных при землетрясениях. С целью выяснения влияния фактора малости колебаний на величину декремента был проведен модельный

эксперимент, в ходе которого регистрировались акселерограммы горизонтальных колебаний с частотами около 6 Гц сварной модели пакагуза при различных величинах возмущающего импульса. Колебания возмущались посредством мягкого удара маятника, отклоняемого до подъема на заданную высоту. Масса модели составляла 22 кг, масса маятника – около 2 кг. Из данных рис.3б, где приведены результаты модельного эксперимента, видно что, во-первых, методы сглаживания и огибающей [3,4] дают идентичные результаты в отличие от сильно завышенных результатов спектрального метода, во-вторых, в данном случае колебаний модели с частотой 6 Гц при переходе от малых возмущений к большим декременты колебаний увеличиваются примерно в 1,5 раза. Поэтому поправку декрементов «на малость» можно ввести на основе допущения, что диссипация энергии за период колебаний (рассеиваемая мощность) пропорциональна энергии

$$\frac{M}{2} [(A_1\omega)^2 - (A_2\omega)^2] \nu = \chi(A) \frac{M}{2} (A_1\omega)^2,$$

где M – масса конструкции, A_1, A_2 – две последовательные амплитуды колебаний, $\omega=2\pi\nu$ - циклическая частота колебаний, $\chi(A)$ – коэффициент пропорциональности, зависящий от амплитуды. Вводя относительный декремент по определению $\exp(2\pi\delta) = A_1 / A_2$, при условии малости декремента δ получим

$$\delta \cong \frac{\chi(A)}{4\pi\nu}.$$

Тогда отношение двух различных декрементов принимает вид

$$\frac{\delta_a}{\delta_b} = \frac{\chi(A_a) \nu_b}{\chi(A_b) \nu_a}.$$

Упрощенно примем, исходя из данных рис.3б, что отношение коэффициентов χ равно 1,5. Тогда принимая частоты модельных испытаний 6 Гц в качестве реперной переписем последнюю формулу в виде

$$\delta_a = \delta_b \left(\frac{\chi(A_a)}{\chi(A_b)} = 1.5 \right) \frac{(\nu_b = 6 \Gamma \text{ц})}{\nu_a} = \delta_b \frac{9}{\nu_a}.$$

Т.е. предлагается поправку «на малость» принять в виде мультипликативного коэффициента (множителя) D , равного $9/\nu_{\max}$. Следует отметить, что качественно такая поправка, обратно пропорциональная частоте колебаний, оправдана теоретически, см. [6] ур. (1.4), (1.9), (1.11). Но имея ввиду возможность только увеличения декремента с увеличением амплитуды колебаний, добавим условие $D \geq 1$. Поэтому формулу коррекции декрементов для статистического анализа можно выбрать в виде:

$$\delta = D \sqrt{\delta_w^2 - \delta_0^2}, \quad \delta_0 = \frac{45\%}{T\nu_{\max}}, \quad D = \frac{9}{\nu_{\max}} \geq 1, \quad (3)$$

Формула (3) позволяет применять описанные поправки как вместе, так и отдельно. Принимая $D=1$, получим поправку только на систематическое завышение спектрального метода, положив $\delta_0=0$, получим поправку «на малость».

Использование поправки «на малость», введенной на основе исследований колебаний модели, в анализе данных для реального оборудования, разумеется, может вызвать законные возражения, но, за неимением других оснований, приходится основываться на данных модельного эксперимента. Ниже будет показано, что эта поправка влияет на оценку доли оборудования с относительным декрементом менее 2%.

На рис.4 приводятся распределения декрементов с поправками и без них. Доля декрементов, меньших 2%, составляет не менее 10%.

Из данных рис.5 следует, что декременты колебаний по вертикальной оси меньше декрементов колебаний по горизонтальным осям. А наличие асимметрии способствует затуханию колебаний.

В целом из представленных данных следуют два основных вывода: 1) доля оборудования с декрементами менее нижнего предела 2%, ниже которого нормативные документы не регламентируют инерционные нагрузки, составляет 10-30%, из которых, с учетом данных рис.2., половина имеет резонансные частоты в критическом диапазоне менее 10Гц, т.е. 5-15% оборудования потенциально не охватываются надлежащим расчетом на сейсмостойкость? Что побуждает поставить вопрос о включении в нормативные документы регламент на инерционные расчетные нагрузки для колебаний с низкими декрементами; 2) для проведения адекватных оценок сейсмостойкости необходима разработка нормативных документов, регламентирующих методы получения и обработки экспериментальных акселерограмм.

Литература

1. Казновский С.П. Направление и состояние исследований сейсмостойкости оборудования и пароводяной арматуры АЭС и АСТ. В сб. «Обеспечение сейсмостойкости атомных станций». М.: Наука, 1987. С.81-96.
2. Казновский С.П., Кравец С.Б. Анализ сейсмостойкости оборудования 1-го блока Ростовской АЭС. В сб.» Новые методы теоретических и экспериментальных исследований материалов, приборов и технологий. Сборник научных трудов.» Новочеркасск, ЮРГТУ, 2001. С. 118-121.
3. НП-031-01 Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций. Федеральный надзор России по ядерной и радиационной безопасности (Госатомнадзор России) М., 2005.

4. Встовский Г.В., Казновский П.С., Казновский А.П. Спектральный метод определения декрементов механических колебаний по результатам динамических испытаний. Заводская лаборатория, 2008, 74, №6, 55-62.
5. Встовский Г.В., Казновский П.С., Казновский А.П. Функциональные аспекты оценки сейсмостойкости по данным динамических испытаний Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций, 2008, N6, в печати
6. Бирбраер А.Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость, СПб, Наука – 1998.

Приложение 1. Перечень использованных источников.

Оборудование Ростовской АЭС (тип реактора ВВЭР-1000, всего 177 единиц оборудования).

- 1. ЗАКЛЮЧЕНИЕ № АКЦШ 96.252 по результатам испытаний на сейсмостойкость технологического оборудования спецкорпуса РоАЭС (18 единиц оборудования).
- 2. ЗАКЛЮЧЕНИЕ № АКЦШ 96.254 по результатам испытаний на сейсмостойкость трубопроводной арматуры реакторного отделения энергоблока №1 РоАЭС (45 единиц оборудования).
- 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ № АКЦШ 96.246 по результатам испытаний на сейсмостойкость технологического оборудования дизельно-генераторных станций (РДЭС) энергоблока №1 РоАЭС (34 единицы оборудования).
- 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ №АКЦШ 96.253 по результатам испытаний на сейсмостойкость технологического оборудования реакторного отделения энергоблока №1 РоАЭС (67 единиц оборудования).
- 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ №АКЦШ 96.255 по результатам испытаний на сейсмостойкость вентиляторного оборудования реакторного отделения энергоблока №1 РоАЭС (13 единиц оборудования).

Оборудование Ленинградской АЭС (тип реактора РБМК-1000, всего 191 единица оборудования).

- 6. ИТОГОВЫЙ ОТЧЕТ №4-76-03. Заключение о сейсмостойкости технологического оборудования блока № 2 ЛАЭС. (21 единица оборудования).
- 7. ТЕХНИЧЕСКАЯ СПРАВКА №1-05. Заключение о сейсмостойкости технологического и электротехнического оборудования блока № 2 ЛАЭС. (40 единиц оборудования).
- 8. ТЕХНИЧЕСКАЯ СПРАВКА №3-38-03. «Расчетно-экспериментальная проверка и обеспечение сейсмостойкости систем вентиляции, обслуживающих помещения с технологическим оборудованием и системами блока №3 ЛАЭС, по согласованному перечню». (35 единиц оборудования).
- 9. ОТЧЕТ ПО НИР «Проведение расчетов сейсмостойкости оборудования блока №1 ЛАЭС по результатам динамических испытаний». (18 единиц оборудования).
- 10. ТЕХНИЧЕСКАЯ СПРАВКА №2-60-03 «Расчетно-экспериментальная проверка и обеспечение сейсмостойкости систем вентиляции, обслуживающих помещения с технологическим оборудованием и системами блока №2 ЛАЭС, по согласованному перечню». (47 единиц оборудования).
- 11. ИТОГОВЫЙ ОТЧЕТ №4-42-03 «Расчетно-экспериментальная проверка и обеспечение сейсмостойкости технологического оборудования и систем блока №3 ЛАЭС по согласованному перечню». (30 единиц оборудования).

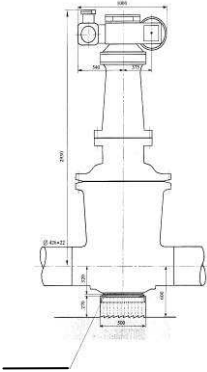
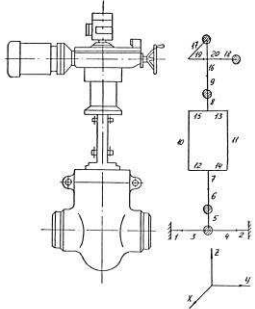
Оборудование Калининской АЭС (тип реактора ВВЭР-1000, всего 35 единиц оборудования).

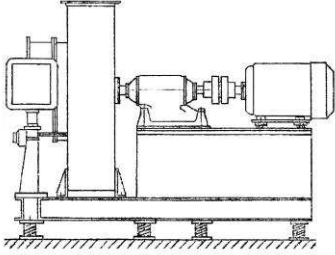
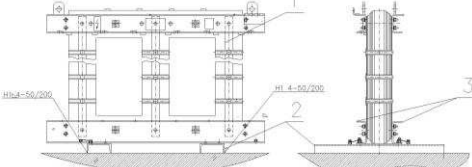
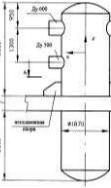
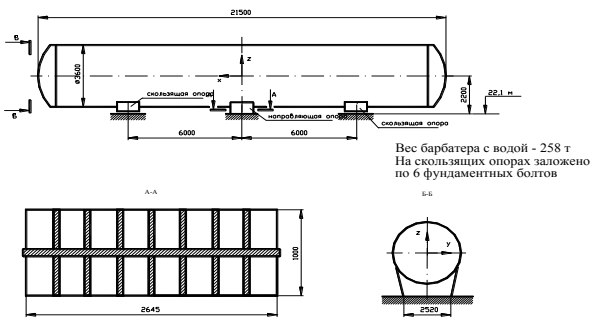
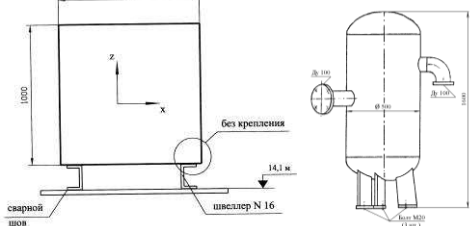
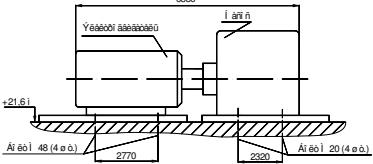
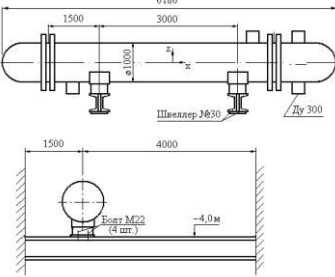
- 12. АННОТАЦИОННЫЙ ОТЧЕТ №2-21 «Расчетно-экспериментальная проверка и обеспечение сейсмостойкости установленного на пусковом блоке №3 КАЭС технологического оборудования по согласованному перечню». (13 единиц оборудования).
- 13. АННОТАЦИОННЫЙ ОТЧЕТ №3-21 «Расчетно-экспериментальная проверка и обеспечение сейсмостойкости установленного на пусковом блоке №3 КАЭС технологического оборудования по согласованному перечню». (22 единиц оборудования).

Аттестация различного оборудования на сейсмостойкость . (всего 23 единицы оборудования).

- **14. ПРОТОКОЛ АТТЕСТАЦИИ НА СЕЙСМОСТОЙКОСТЬ №299-03-07.** Трансформаторы силовые трехфазные сухие с литой изоляцией типа аТСЕ мощностью от 160 до 2500 кВА на напряжения 10,5 кВ. (5 единиц оборудования).
- **15. ПРОТОКОЛ АТТЕСТАЦИИ НА СЕЙСМОСТОЙКОСТЬ №148-03-07.** Подстанции трансформаторные комплектные мощностью до 1600 кВА на напряжение до 10 кВ для стационарной наружной установки. (5 единиц оборудования).
- **16. ПРОТОКОЛ АТТЕСТАЦИИ НА СЕЙСМОСТОЙКОСТЬ №213-03-08.** Трансформаторы силовые трехфазные сухие с литой изоляцией типа аТСЕ мощностью от 63 до 2500 кВА на напряжения 10,5 кВ. (5 единиц оборудования).
- **17. ПРОТОКОЛ АТТЕСТАЦИИ НА СЕЙСМОСТОЙКОСТЬ №113-03-08.** Подстанции трансформаторные комплектные 2БКТП мощностью до 1600 кВА на напряжение 10/0,4 кВ в железобетонном корпусе для стационарной наружной установки. (5 единиц оборудования).
- **18. ПРОТОКОЛ АТТЕСТАЦИИ НА СЕЙСМОСТОЙКОСТЬ №126-03-08.** Клапаны противопожарные комбинированные серии «Фаер 1М». (3 единицы оборудования).

Приложение 2. Типы оборудования и обозначения осей.

№	Тип оборудования	Эскиз	Обозначение
1	Трубопроводная арматура опёртая (вентили, задвижки и пр.)		А
2	Трубопроводная арматура свободная		В

3	Вентиляторное и прочее оборудование, установленное на пружинах		C
4	Трансформаторы		D
5	Сосуды вертикально стоящие на балках (фильтры, монжюсы, теплообменники)		E
6	Емкостное оборудование, горизонтально расположенное на опорах (теплообменники, барбатеры, сепараторы, коллекторы и пр.)	<p>Конструктивная схема барбатера</p>  <p>Рис. 2.9.1</p>	F
7	Сосуды вертикально стоящие на опорах (фильтры, баки и пр.)		G
8	Оборудование на жестком основании (насосы, компрессоры, конденсаторы и пр.)		H
9	Горизонтально расположенное емкостное и технологическое оборудование на балках		I

10	Электротехническое оборудование (шкафы, щиты управления и пр.)		J
----	--	--	---

Для всех единиц оборудования: ось OZ всегда направлена вертикально вверх, ось OX вдоль оси симметрии, ось OY, соответственно, нормально оси OX. Кроме случаев G и E, ось симметрии – вертикальная ось OZ.

Приложение 3. Статистика значений относительных декрементов колебаний δ (определенных спектральным методом) в низкочастотной (менее 33 Гц) и в высокочастотной (более 33 Гц) областях в диапазонах от 0.5% до 2%; от 2% до 5%, от 5% и более.

№ источника	Низко-частотная область (< 33 Гц)			Высоко-частотная область (> 33 Гц)		
	Количество единиц оборудования, N					
	$\delta \leq 0.02$	$0.02 < \delta \leq 0.05$	$\delta > 0.05$	$\delta \leq 0.02$	$0.02 < \delta \leq 0.05$	$\delta > 0.05$
1	0	4	10	0	2	1
2	12	19	6	2	0	0
3	0	4	10	5	3	10
4	8	12	4	31	3	0
5	2	6	2	2	1	0
6	6	5	1	0	3	6
7	12	24	12	0	1	1
8	17	16	0	2	0	0
9	10	6	0	0	2	1
10	11	32	4	0	0	0
11	19	10	0	1	0	0
12	8	1	1	0	2	1
13	11	12	0	0	0	0
14	4	1	0	0	0	0
15	2	3	0	0	0	0
16	4	1	0	0	0	0
17	3	2	0	0	0	0
18	0	0	2	1	0	0
Всего:	129	158	52	44	13	20

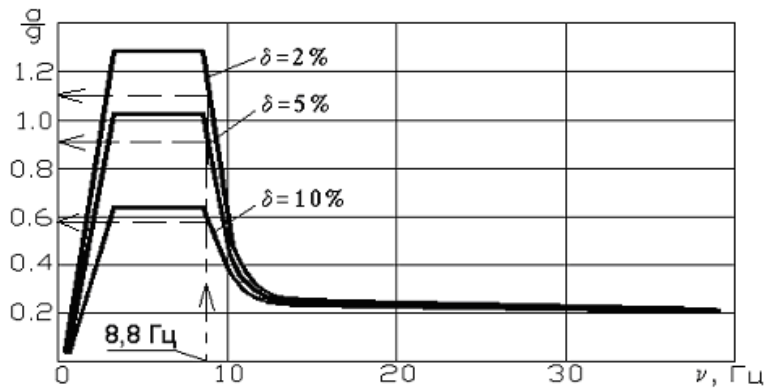


Рис.1. Схема определения расчетного ускорения (в единицах g), обусловленного сейсмическим воздействием для оборудования с наименьшей собственной частотой 8,8 Гц и различными относительными декрементами $\delta=2, 5, 10\%$. Величины собственной частоты и декремента существенно влияют на выбор расчетной сейсмической нагрузки.

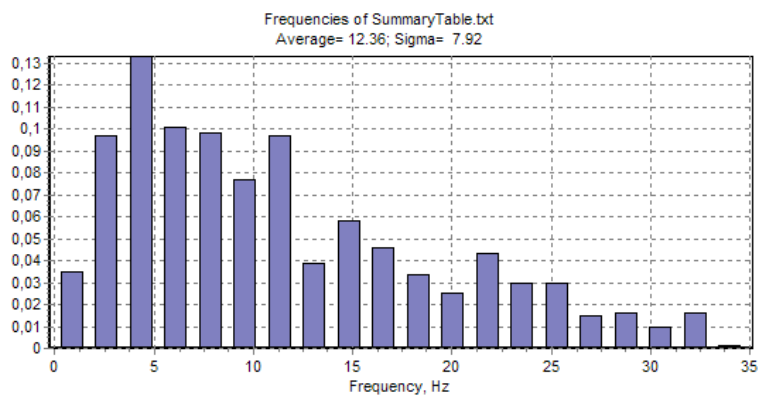


Рис.2. Распределение значений собственных частот по всем типам оборудования и всем направлениям.

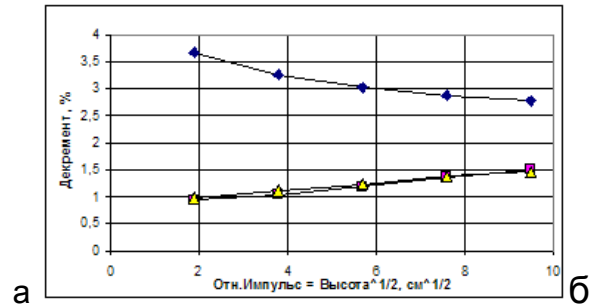
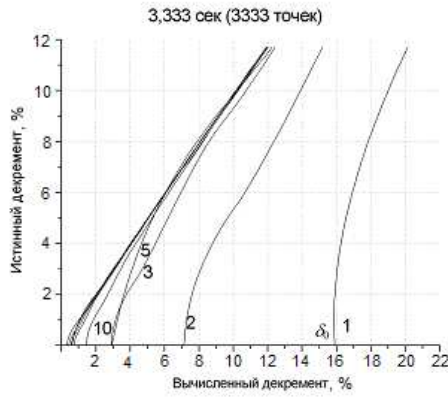


Рис.3. а) Пример вычисленной зависимости истинного декремента δ от значения δ_w , вычисленного по формуле (1) [3], б) - зависимость декрементов колебаний (6 Гц) модельной системы от относительного импульса, вычисленных спектральным методом по формуле (1) (ромбы), методом сглаживания [3,4] (квадраты) и методом огибающей [4] (треугольники).

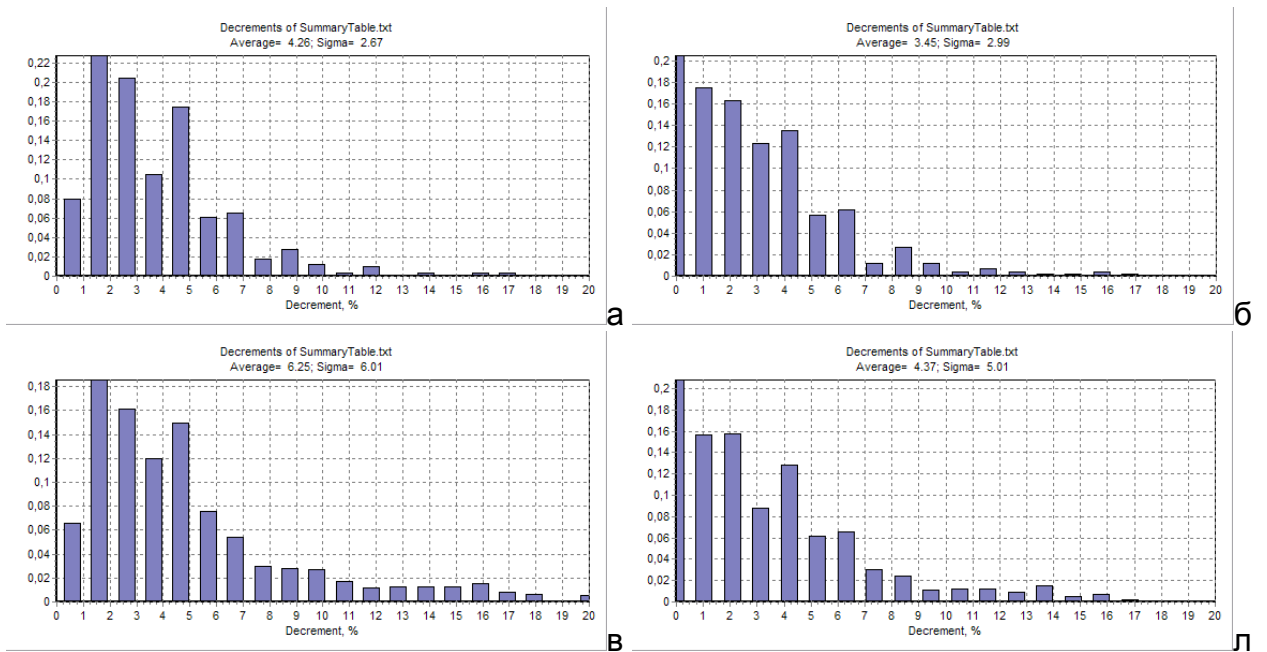
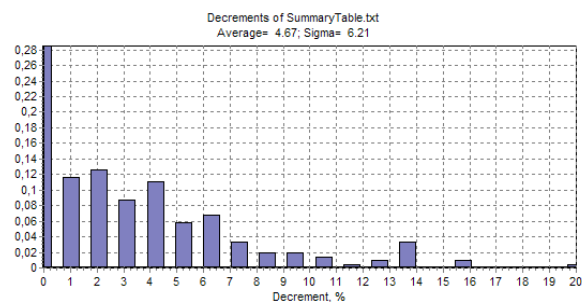
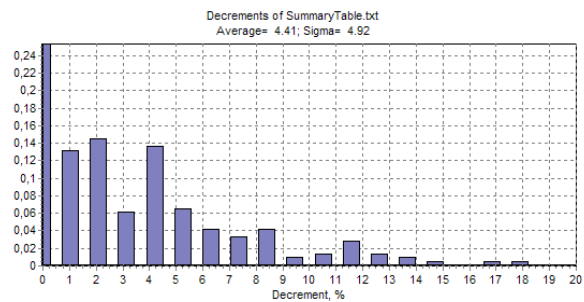
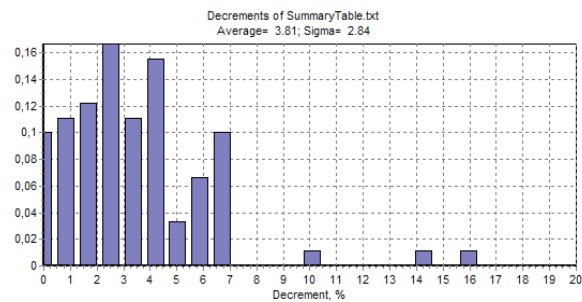


Рис.4. Распределения значений декрементов для всех типов оборудования и всех направлений: а) без поправок, б) с поправкой на систематическое завышение спектрального метода, в) с поправкой «на малость», г) с обоими поправками. Доли декрементов ниже 2% составляют 12, 36, 11 и 35 %, соответственно.



а

б

Рис.5. Распределения декрементов колебаний с учетом обеих поправок: а) для типов Е и G по оси симметрии Z, б) для всех типов, кроме Е и G, по оси симметрии X, в) для всех типов, кроме Е и G, по оси Y. Доли декрементов ниже 2% составляют 29, 36, и 40 %, соответственно.