

Результаты анализа натурных исследований собственных динамических характеристик важного для безопасности оборудования АЭС

- Казновский А. П.¹, канд. техн. наук, ОАО “Атомтехэнерго”, Московская обл., Мытищи
- Касьянов К. Г., канд. техн. наук, ОАО “Атомтехэнерго”, Московская обл., Мытищи
- Рясный С. И., доктор техн. наук, ОАО “Атомтехэнерго”, Московская обл., Мытищи

Предложена классификация важного для безопасности оборудования АЭС по характеру его динамического поведения при сейсмических воздействиях. Проанализирован обширный банк данных по результатам динамических испытаний по всей номенклатуре тепломеханического оборудования на энергоблоках с реакторами ВВЭР-1000 и РБМК-1000. Приведены результаты исследования статистических закономерностей распределения значений частот и декрементов колебаний с учётом фактора “малости возмущений”, влияющего на определение декрементов колебаний. Выявлена необходимость корректировки нормативных требований по выбору значений декрементов колебаний при задании инерциальных нагрузок на оборудование от сейсмических воздействий при проведении проектных расчётов. Определены и предложены минимальные значения декрементов колебаний для всех рассмотренных типов оборудования в зависимости от направлений динамических воздействий и собственных частот колебаний для принятия в качестве консервативных нормативных значений в случае отсутствия реальных экспериментальных данных на стадии выполнения проектных обоснований сейсмостойкости.

Ключевые слова: атомная электростанция, оборудование, сейсмостойкость, динамические характеристики, собственные частоты, декременты колебаний.

Работы по расчётно-экспериментальному обоснованию сейсмостойкости и устойчивости к внешним воздействиям важного для безопасности оборудования АЭС с определением его собственных динамических характеристик в реальных условиях монтажа, закрепления и трубопроводной обвязки [1] рекомендуются стандартами МАГАТЭ [2] и регламентируются российским федеральным нормативным документом [3] и отраслевым нормативно-методическим документом [4 – 6] для всех вводимых в эксплуатацию и при обосновании продления срока эксплуатации действующих энергоблоков АЭС. Получаемые экспериментальные данные имеют важное практическое значение для уточнения инерциальных нагрузок на оборудование от резонансных внешних воздействий (сейсмических, воздушной ударной волны, падения самолётов и др.).

В связи с интенсивным сооружением новых энергоблоков АЭС в России и по российским проектам за рубежом, продлением сроков эксплуатации ряда действующих энергоблоков и соответствующим возрастанием объёмов работ по расчётно-экспериментальному обоснованию сейсмостойкости и устойчивости к внешним воздействиям

важного для безопасности оборудования АЭС особое значение приобретают анализ и систематизация получаемых результатов динамических испытаний.

Наибольший интерес при анализе результатов динамических испытаний представляет выявление статистических закономерностей, присущих характеристикам собственных колебаний оборудования в условиях его фактического состояния, т.е. в реальных условиях монтажа, закрепления и обвязки непосредственно на АЭС. Кроме того, полученные данные позволяют ввести экспериментальное обоснование и уточнение принятых в российской нормативной документации [7, 8] значений относительных логарифмических декрементов колебаний (далее декрементов колебаний), используемых при проектных обоснованиях устойчивости оборудования АЭС к внешним воздействиям [9].

В 2008 г. был выполнен общий статистический анализ полученных на тот момент результатов испытаний 416 единиц оборудования на блоках № 1 – 3 Ленинградской АЭС, № 3 Калининской АЭС, № 1 Ростовской АЭС, а также результатов испытаний различного электротехнического оборудования на заводах-изготовителях [10].

¹ Казновский Арсений Павлович: kaznovskyap@atech.ru

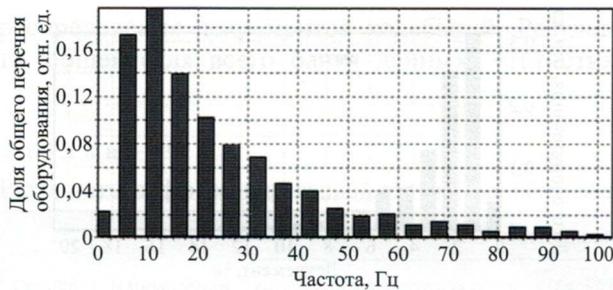


Рис. 1. Распределение значений собственных частот по всем направлениям в диапазоне 0 – 100 Гц

Была подчёркнута важность и исследован характер влияния на точность определения декрементов колебаний фактора “малости возмущений” при возбуждении колебаний малых амплитуд – на 1 – 2 порядка ниже в сравнении с реальными сейсмическими воздействиями, что связано с требованием неповреждаемости оборудования при испытаниях непосредственно на АЭС. На основании специально проведённого модельного эксперимента было показано, что при переходе от малых возмущений колебаний к большим декременты увеличиваются не более чем в 1,5 – 2 раза.

С целью статистического анализа накопленных данных всё оборудование было классифицировано по группам в соответствии с характером динамического поведения при резонансных внешних воздействиях. Каждая группа включала в себя несколько различных типов подобного оборудования. Предлагаемая классификация (табл. 1) учитывает основные типы оборудования, наиболее распространённые на АЭС, и состоит из 12 групп.

В статье приведены результаты анализа данных, накопленных авторами на пусковых и действующих энергоблоках АЭС (№ 1 – 4 Ленинградской, № 2 Ростовской, № 4 Калининской АЭС) за период с 2005 г. по настоящее время. Накопленный обширный банк данных по результатам динамических испытаний тепломеханического оборудования на энергоблоках с реакторами ВВЭР-1000 и РБМК-1000 включает в себя значения низших собственных частот и соответствующих декрементов колебаний, определённых для выбранных 1684 единиц оборудования. В банк данных вошло оборудование, для которого возможна однозначная трактовка результатов проведённых динамических испытаний (оборудование с ярко выраженными резонансными частотами).

В накопленном банке данных содержатся также результаты выполненных на предприятиях-изготовителях динамических испытаний механически автономного (не имеющего внешних обвязок) оборудования при его аттестации на сейсмостойкость, необходимой для дальнейших поставок на АЭС и другие промышленные объекты, расположенные в сейсмоопасных регионах в России и за рубежом. Аттестация выполнялась расчётно-экспериментальным методом при строгом воспроизведении реальных условий раскрепления и монтажа оборудования на эксплуатирующем изделие объекте. Всего в процессе таких аттестаций была изучена сейсмостойкость порядка 150 типопредставителей различного оборудования (в том числе электротехнического).

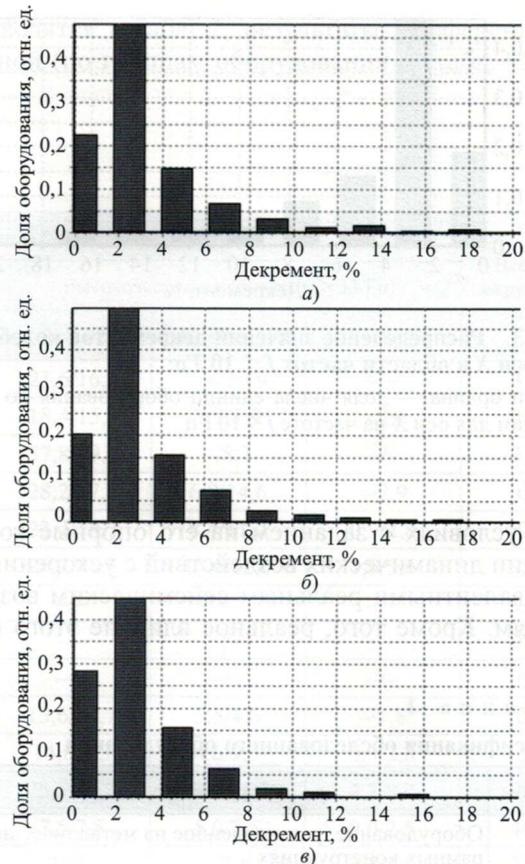


Рис. 2. Распределение значений декрементов колебаний в области частот $f < 33$ Гц:

а – для оси X ; б – для оси Y ; в – для оси Z ; по осям ординат – доля числа единиц оборудования по всем группам соответственно для оси X , оси Y и оси Z

периметральным методом при строгом воспроизведении реальных условий раскрепления и монтажа оборудования на эксплуатирующем изделие объекте. Всего в процессе таких аттестаций была изучена сейсмостойкость порядка 150 типопредставителей различного оборудования (в том числе электротехнического).

Далее представлены результаты статистического анализа полного банка данных по результатам динамических испытаний. Фактор “малости возмущений” предлагается учитывать с условным допущением, что декременты колебаний при малых воздействиях будут меньше, чем декременты при реальных сейсмических воздействиях, не более чем в 1,5 раза. Таким образом, предлагается далее ввести поправку “малости возмущений” в виде коэффициента-множителя, равного 1,5, применительно ко всем значениям декрементов колебаний из полного банка данных. Однако следует основываться прежде всего на результатах анализов без учёта поправок, так как для реальной оценки влияния фактора “малости возмущений” на определение декрементов колебаний необходимо выполнить многочисленные экспериментальные исследования на различном оборудовании в натур-

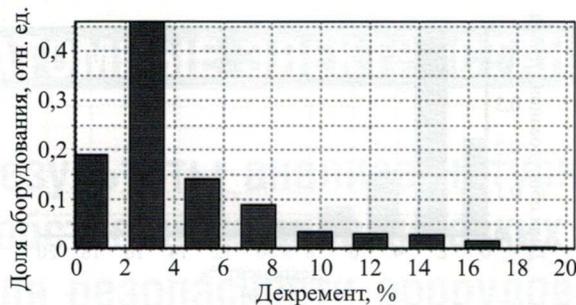


Рис. 3. Распределение значений декрементов колебаний для оси X в области частот $f < 10$ Гц:

по оси ординат – доля числа единиц оборудования по всем группам для оси X на частоте $f < 10$ Гц

ных условиях с заданием на его опорные конструкции динамических воздействий с ускорениями, эквивалентными реальным сейсмическим воздействиям. Кроме того, реальное влияние этого фак-

Таблица 1
Классификация обследованного оборудования

Группа	Оборудование
A	Оборудование, установленное на металлических рамных конструкциях
B	Прямолинейные участки трубопроводов с сосредоточенной массой: обратные клапаны и др.
C	Вентиляционные агрегаты и другое оборудование, установленное на пружинных виброизоляторах
D	Вентиляционное оборудование, установленное на каучуковых (резиновых) виброизоляторах либо без виброизоляторов
E	Вертикально расположенные сосуды, закреплённые на балках перекрытий или подвесах: фильтр-ловушки, теплообменники
F	Горизонтально расположенные сосуды с собственными опорными конструкциями, установленные на фундаментах или бетонном основании: теплообменники, баки
G	Вертикально расположенные сосуды с собственными опорными конструкциями, установленные на бетонном основании: теплообменники с юбочными и другими опорами
H	Оборудование, имеющее толщину стенок корпуса больше 50 мм и закреплённое на бетонном основании: насосы, пластинчатые теплообменники. Жёстко закреплённое ("замурованное") оборудование: теплообменники и герметичные системы вентиляции, клапаны противопожарные
I	Горизонтально расположенные сосуды, установленные на балках перекрытий
J	Электротехнические устройства, размещённые в шкафах, закреплённых к основанию (закладным) в нескольких (4 и более) точках
K	Трубопроводная арматура с вынесенным приводом (вентили, задвижки, D_y 10 – 800) без собственных опор (отсутствуют опоры под арматурой либо вблизи арматуры)
L	Трубопроводная арматура с вынесенным приводом D_y 10 – 800 с собственными опорами (непосредственно под арматурой или вблизи арматуры)

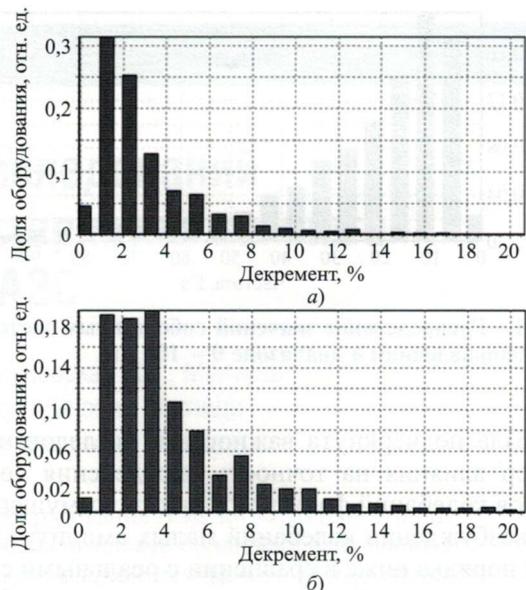


Рис. 4. Распределение значений декрементов колебаний по всем осям в области частот $f < 33$ Гц:

а – без поправок; б – с учётом фактора "малости возмущений"; по оси ординат – доля числа единиц общего перечня оборудования

тора невелико и обеспечивает небольшой дополнительный запас по прочности.

Анализировались декременты и собственные частоты колебаний вдоль трёх различных осей (направлений динамических воздействий). Направления осей для всех групп оборудования (табл. 1) выбраны следующим образом: ось Z всегда направлена вертикально вверх, кроме оборудования групп K и L, когда ось Z направлена вдоль оси штока арматуры; ось X – вдоль оси симметрии (или вдоль трубы для арматуры); ось Y – перпендикулярно оси X, кроме случаев, когда ось симметрии – вертикальная ось Z.

На рис. 1 изображена диаграмма распределения собственных частот по всем типам оборудования и всем направлениям; на рис. 2, 3 – диаграммы

Таблица 2

Общая статистика значений декрементов колебаний банка данных по результатам динамических испытаний тепломеханического оборудования

Направление	Количество единиц оборудования, %			
	Низкочастотная область ($f \leq 33$ Гц)		$f < 10$ Гц	
	$\delta < 0,02$	$0,02 \leq \delta \leq 0,05$	$\delta > 0,05$	$\delta < 0,02$
X	29,7/14,9	33,2/36,9	13,4/24,5	5,5/2,2
Y	35,0/16,4	33,2/40,2	13,3/24,9	6,8/2,4
Z	29,2/14,5	29,9/34,5	10,6/21,0	4,6/1,9

Примечание. Числитель – процент общего перечня оборудования без поправок; знаменатель – процент общего перечня оборудования с учётом фактора "малости возмущений".

распределения декрементов колебаний. Результаты общей (для всего банка данных) статистики

приводятся в табл. 2; результаты дифференцированной (по группам оборудования из табл. 1) ста-

Таблица 3

Результаты дифференцированной статистики оборудования

Группа	Направление	Количество единиц оборудования, % оборудования группы						Всего в группе, шт.	
		Низкочастотная область ($f \leq 33$ Гц)			Высокочастотная область ($f > 33$ Гц)				
		$\delta < 0,02$	$0,02 \leq \delta \leq 0,05$	$\delta > 0,05$	$\delta < 0,02$	$0,02 \leq \delta \leq 0,05$	$\delta > 0,05$		
<i>A</i>	X	35,1/10,8	24,3/43,2	13,5/18,9	21,6/16,2	5,4/10,9	-/-	37	
	Y	44,7/18,4	28,9/50,0	-/5,3	18,4/15,8	7,9/7,9	-/2,6	38	
	Z	24,3/8,1	27,0/32,4	10,8/21,6	37,8/29,7	-/8,1	-/-	37	
<i>B</i>	X	36,9/14,6	25,2/43,7	2,9/6,8	28,2/17,5	6,8/14,6	-/2,9	103	
	Y	37,4/18,7	27,1/36,4	2,8/12,1	23,4/18,7	8,4/11,2	0,9/2,8	107	
	Z	40,2/20,6	15,9/31,8	1,9/5,6	26,2/15,9	14,0/20,6	1,9/5,6	107	
<i>C</i>	X	7,5/2,2	52,7/30,1	39,8/67,7	-/-	-/-	-/-	93	
	Y	10,2/4,1	44,9/26,5	44,9/69,4	-/-	-/-	-/-	98	
	Z	4,0/1,0	60,6/37,4	35,4/61,6	-/-	-/-	-/-	99	
<i>D</i>	X	14,7/6,4	39,4/28,4	24,8/44,0	15,6/14,7	5,5/4,6	-/1,8	109	
	Y	19,4/7,4	29,6/28,7	30,6/43,5	14,8/8,3	4,6/9,3	0,9/2,8	108	
	Z	10,2/1,0	21,4/29,6	28,6/29,6	25,5/16,3	10,2/15,3	4,1/8,2	98	
<i>E</i>	X	15,0/0,0	50,0/57,5	22,5/30,0	7,5/7,5	5,0/2,5	0,0/2,5	40	
	Y	19,4/0,0	61,1/61,1	13,9/33,3	2,8/-	-/2,8	2,8/2,8	36	
	Z	17,2/3,4	58,6/48,3	20,7/44,8	-/-	3,4/-	-/3,4	29	
<i>F</i>	X	34,6/7,7	44,2/65,4	15,4/21,2	3,8/-	1,9/5,8	-/-	52	
	Y	22,0/12,0	44,0/42,0	12,0/24,0	16,0/14,0	6,0/6,0	-/2,0	50	
	Z	20,8/6,3	22,9/37,5	10,4/10,4	37,5/33,3	8,3/10,4	4,2/6,3	48	
<i>G</i>	X	26,5/10,3	38,2/35,3	14,0/33,1	14,0/11,0	6,6/6,6	0,7/3,7	136	
	Y	25,7/10,3	43,4/40,4	13,2/31,6	13,2/10,3	2,9/4,4	1,5/2,9	136	
	Z	11,7/8,1	31,5/24,3	13,5/24,3	26,1/23,4	13,5/10,8	3,6/9,0	111	
<i>H</i>	X	12,0/3,8	11,4/15,8	8,2/12,0	44,9/31,6	19,6/28,5	3,8/8,2	158	
	Y	15,7/5,4	13,9/19,3	9,0/13,9	41,0/20,5	18,1/34,3	2,4/6,6	166	
	Z	10,9/4,4	13,1/12,4	5,8/13,1	43,8/30,7	19,0/24,8	7,3/14,6	137	
<i>I</i>	X	18,8/12,5	62,5/37,5	12,5/43,8	6,3/6,3	-/-	-/-	16	
	Y	47,4/31,6	36,8/36,8	10,5/26,3	5,3/5,3	-/-	-/-	19	
	Z	16,7/5,6	61,1/50,0	11,1/33,3	11,1/11,1	-/-	-/-	18	
<i>J</i>	X	12,7/2,9	43,4/34,1	36,4/55,5	2,9/1,7	4,0/4,0	0,6/1,7	173	
	Y	15,7/2,5	40,9/38,4	39,6/55,3	2,5/1,3	1,3/1,9	-/0,6	159	
	Z	18,0/4,5	36,9/24,3	15,3/41,4	18,0/10,8	10,8/15,3	0,9/3,6	111	
<i>K</i>	X	43,5/27,4	29,7/38,8	3,2/10,3	20,9/16,4	2,4/6,7	0,2/0,4	464	
	Y	52,3/27,1	30,1/46,9	3,0/11,4	12,0/9,0	2,4/4,7	0,2/0,9	465	
	Z	47,1/26,3	27,9/43,0	5,9/11,6	15,1/11,2	3,5/6,6	0,4/1,3	456	
<i>L</i>	X	40,0/21,4	31,5/42,0	8,1/16,3	13,9/10,2	6,4/8,5	-/1,7	295	
	Y	48,3/24,2	34,8/48,3	7,0/17,5	7,6/7,3	2,0/2,0	0,3/0,7	302	
	Z	35,9/17,6	32,1/38,3	5,5/17,6	20,3/15,2	6,2/10,7	-/0,7	290	
Всего	X	29,7/14,9	33,2/36,9	13,4/24,5	17,5/13,0	5,7/8,7	0,5/2,0	1676	
	Y	35,0/16,4	33,2/40,2	13,3/24,9	15,6/9,3	4,3/7,3	0,4/1,8	1684	
	Z	29,2/14,5	29,9/34,5	10,6/21,0	21,0/15,4	7,6/11,0	1,2/3,9	1541	

П р и м е ч а н и е . Числитель – процент единиц оборудования каждой группы без поправок; знаменатель – процент единиц оборудования каждой группы с учётом поправки.

тистики без поправок и с поправкой на фактор “малости возмущений” – в табл. 3.

Распределения значений декрементов для всех типов оборудования и всех направлений с поправкой на фактор “малости возмущений” и без поправки представлены на рис. 4.

Доля частот в наиболее критическом диапазоне сейсмических резонансов 0 – 10 Гц составила 24%, доля особо критических случаев ($f < 10$ Гц в сочетании с декрементом колебаний $\delta < 0,02$) составила для направлений X , Y и Z соответственно 5,5; 6,8 и 4,6% без поправок и 2,2; 2,4 и 1,9 % с поправкой.

На долю оборудования с декрементами ниже значения 0,02 и низшей резонансной частотой меньше 33 Гц приходится почти 1/3 общего переч-

ня оборудования, вошедшего в банк данных, без учёта поправок. Но даже с учётом поправки на фактор “малости возмущений” около 15% всего оборудования не соответствуют самим консервативным нормам ПНАЭ Г-7-002-86 [7], регламентирующим принимать расчётное значение декремента колебаний, равным 0,02.

По результатам дифференцированной статистики (табл. 3) можно сделать вывод, что около 65% всего оборудования имеют низшую частоту меньше 33 Гц и декремент колебаний в диапазоне 0,005 – 0,05, причём в каждой из рассматриваемых групп доля оборудования с декрементом меньше 0,02 составляет от 10 до 40% единиц. В связи с этим возникает законный вопрос о необходимости корректировки нормативных требований по выбо-

Т а б л и ц а 4

Минимальные значения декрементов колебаний

Группа	Направление	Нижняя граница декремента колебаний без поправок			Нижняя граница декремента колебаний с коэффициентом 1,5			Низшая частота, Гц
		$f \leq 10$	$10 < f \leq 20$	$20 < f \leq 30$	$f \leq 10$	$10 < f \leq 20$	$20 < f \leq 30$	
<i>A</i>	<i>X</i>	0,062	0,010	0,012	0,093	0,015	0,018	6,3
	<i>Y</i>	0,030	0,009	0,008	0,045	0,014	0,012	8,8
	<i>Z</i>	0,039	0,012	0,007	0,059	0,018	0,011	6,0
<i>B</i>	<i>X</i>	0,012	0,008	0,007	0,018	0,012	0,011	5,3
	<i>Y</i>	0,011	0,007	0,005	0,017	0,011	0,008	4,0
	<i>Z</i>	0,010	0,008	0,005	0,015	0,012	0,008	4,0
<i>C</i>	<i>X</i>	0,012	0,011	Нет данных	0,018	0,017	Нет данных	1,5
	<i>Y</i>	0,012	0,017	0,011	0,018	0,026	0,017	0,9
	<i>Z</i>	0,013	0,013	0,009	0,020	0,020	0,014	2,7
<i>D</i>	<i>X</i>	0,014	0,008	0,011	0,021	0,012	0,017	2,3
	<i>Y</i>	0,025	0,009	0,009	0,038	0,014	0,014	2,0
	<i>Z</i>	0,016	0,016	0,019	0,024	0,024	0,029	3,0
<i>E</i>	<i>X</i>	0,014	0,017	0,013	0,021	0,026	0,020	4,5
	<i>Y</i>	0,014	0,013	0,016	0,021	0,020	0,024	4,0
	<i>Z</i>	0,018	0,012	0,021	0,027	0,018	0,032	3,0
<i>F</i>	<i>X</i>	0,014	0,012	0,010	0,021	0,018	0,015	4,2
	<i>Y</i>	0,020	0,010	0,009	0,030	0,015	0,014	3,3
	<i>Z</i>	0,029	0,016	0,011	0,044	0,024	0,017	4,8
<i>G</i>	<i>X</i>	0,012	0,007	0,014	0,018	0,011	0,021	4,8
	<i>Y</i>	0,011	0,005	0,011	0,017	0,008	0,017	4,8
	<i>Z</i>	0,024	0,010	0,007	0,036	0,015	0,011	5,4
<i>H</i>	<i>X</i>	Нет данных	0,019	0,008	Нет данных	0,029	0,012	10,5
	<i>Y</i>	0,080	0,010	0,010	0,120	0,015	0,015	2,9
	<i>Z</i>	0,050	0,013	0,007	0,075	0,020	0,011	8,7
<i>I</i>	<i>X</i>	0,015	0,011	Нет данных	0,023	0,017	Нет данных	6,5
	<i>Y</i>	0,027	0,012	0,012	0,041	0,018	0,018	3,8
	<i>Z</i>	0,029	0,018	0,014	0,044	0,027	0,021	8,7
<i>J</i>	<i>X</i>	0,010	0,012	0,010	0,015	0,018	0,015	3,0
	<i>Y</i>	0,014	0,008	0,019	0,021	0,012	0,029	2,7
	<i>Z</i>	0,016	0,014	0,010	0,024	0,021	0,015	4,0

ру значений декрементов колебаний при задании инерциальных нагрузок на оборудование от сейсмических и других внешних резонансных воздействий при проведении проектных расчётов.

Так как нагрузки от сейсмических воздействий обусловлены сочетанием динамических характеристик (частот, форм и декрементов колебаний), предлагается в случае отсутствия реальных экспериментальных данных в качестве консервативных нормативных значений принимать приведённые в табл. 4 полученные минимальные значения декрементов, соответствующих различным направлениям динамических воздействий и различным частотным диапазонам.

Выводы

1. Предложена классификация важного для безопасности оборудования АЭС по характеру его динамического поведения при сейсмических воздействиях.

2. На основе анализа обширного банка данных, полученного по результатам динамических испытаний по всей номенклатуре тепломеханического оборудования на энергоблоках с реакторами ВВЭР-1000 и РБМК-1000, исследованы статистические закономерности распределения значений частот и декрементов колебаний с учётом фактора “малости возмущений”, влияющего на результаты определения декрементов колебаний.

3. Выявлено, что на долю оборудования с низкой собственной частотой меньше 33 Гц и декрементом колебаний в диапазоне 0,005 – 0,05 приходится около 65% всего оборудования, причём для каждой из рассматриваемых групп от 10 до 40% единиц имеют декременты менее величины 0,02, установленной ПНАЭ Г-7-002-86. В связи с этим выявлена необходимость соответствующей корректировки нормативных требований по выбору значений декрементов колебаний при задании инерциальных нагрузок на оборудование от сейсмических воздействий при проведении проектных расчётов.

4. Определены и предложены минимальные значения декрементов колебаний для всех рассмотренных типов оборудования в зависимости от направлений динамических воздействий и собственных частот колебаний для принятия в качестве консервативных нормативных значений в случае отсутствия реальных экспериментальных данных на стадии выполнения проектных обоснований сейсмостойкости.

Список литературы

1. Сейсмическая безопасность атомных станций / Ананьев А. Н., Казновский П. С., Казновский С. П., Лебедев В. И., Чеченов Х. Д. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011.
2. Проектирование и аттестация сейсмостойких конструкций для атомных электростанций. Серия NS-G-1.6. Вена: МАГАТЭ, 2008.
3. Учёт внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии. НП-064-05. – Ядерная и радиационная безопасность, 2006, № 3 (40).
4. Подтверждение сейсмостойкости оборудования АЭС после монтажа / Казновский П. С., Казновский А. П., Сааков Э. С., Рясный С. И. – Электрические станции, 2012, № 12.
5. МТ 1.2.2.04.0069-2012. Методика подтверждения динамических характеристик систем и элементов энергоблоков АЭС важных для безопасности. М.: ОАО “Концерн “Росэнергоатом”, 2012.
6. Нормативное регулирование в области обеспечения сейсмостойкости важных для безопасности систем и элементов энергоблоков АЭС / Казновский А. П., Казновский П. С., Рясный С. И., Сааков Э. С. – Электрические станции, 2012, № 9.
7. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчёта на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. М.: Энергоатомиздат, 1989.
8. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций НП-031-01. – Вестник Госатомнадзора России, 2001, № 3.
9. Встовский Г. В., Казновский А. П., Казновский П. С. Влияние декрементов на сейсмическую устойчивость оборудования АЭС и методы их определения. – Тяжелое машиностроение, 2009, № 1.
10. Встовский Г. В., Казновский П. С., Казновский А. П. Фактическая статистика декрементов колебаний оборудования АЭС. – Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций, 2009, № 2.