

ВИБРОАКУСТИЧЕСКИЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ИЗОЛЯТОРОВ

**Вебер Ю.В., Шахова А.В.,
Научный руководитель Егонский А.А.
Сибирский федеральный университет**

Содержание

1 Виброакустический метод контроля механического состояния опорно-стержневых изоляторов (МИК-1).....	3
1.1 Описание МИК-1.....	3
1.2 Проведение анализа.....	4
1.3 Методика и принципы выявления дефектов.....	5
2 Анализ испытаний на подстанции «Казачья».....	6
3 Анализ достоверности комплекса МИК-1.....	13
4 Затраты предприятия при использовании комплекса МИК-1.....	15
Список литературы.....	17

1 Вибро-акустический метод контроля механического состояния опорно-стержневых изоляторов (МИК-1)

МИК – 1 мобильный индикаторный комплекс – предназначен для контроля механического состояния фарфоровых опорно-стержневых изоляторов, используемых для изоляции и крепления токоведущих частей в электрических аппаратах, распределительных устройствах электрических станций и подстанций, комплектных распределительных устройствах, токопроводах переменного тока напряжением 110 – 220 кВ, как с отключением, так и без отключения рабочего напряжения, а также изоляторов резерва.

1.1 Описание МИК-1

Вибро-акустический контроль прочности опорно-стержневых изоляторов осуществляется мобильным индикатором комплексом МИК-1. Он состоит из блока регистрации и пакета специализированных программ, которые устанавливаются на персональный компьютер. На рисунке 2 приведён общий вид блока регистрации, на рисунке 3 приведена панель управления блока регистратора.

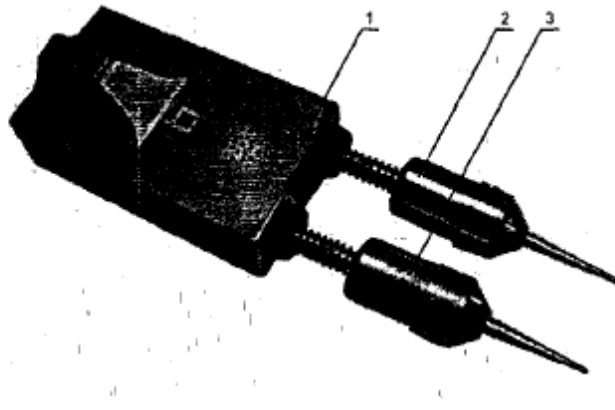


Рисунок 2 – Общий вид блока регистратора: 1 – корпус, 2 – щуп приемника, 3 – щуп излучателя

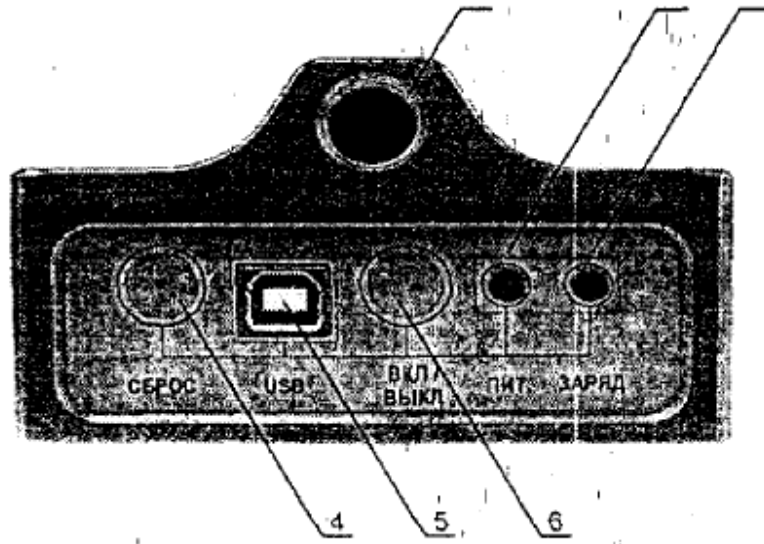


Рисунок 3 –
Панель

управления блока регистратора: 1 – резьбовое отверстие для крепления штанги или рукоятки, 2 – индикатор питания — диод зеленого цвета, 3 – индикатор состояния процессов — диод красного цвета, 4 – кнопка сброса, 5- USB-порт, 6- кнопка включения-выключения питания

Прибор включает в себя:

- силовой возбудитель случайных колебаний;
- приемник-регистратор для записи реакции изолятора на силовое возбуждения;
- пакет программ для анализа полученных результатов.

1.2 Проведение анализа

Состояние опорно-стержневого изолятора определяется по величине его механической прочности, а именно несущей способности (минимальное усилие, при котором может произойти разрушение изолятора), которая определяется по оценке спектральной

плотности мощности (СПМ) реакции изолятора на воздействие случайной вибрации с плоским спектром.

Предельная нагрузка определяется по формуле:

$$\frac{P_1}{P_0} = \left(\frac{w_1}{w_0} \right)^2,$$

где P_0 – предельная нагрузка неповрежденного изолятора; P_1 – предельная нагрузка поврежденного изолятора; w_1 – частота пика СПМ вибрации поврежденного изолятора; w_0 – частота пика СПМ вибрации неповрежденного изолятора.

Критериями оценки механического состояния изолятора при первом обследовании, проведенном при положительной температуре, являются:

а) изолятор в удовлетворительном состоянии

наличие одного максимума в СПМ в диапазоне частот 4000-5000 Гц (основная или определяющая частота – 4500 Гц это частота стоячей волны в изоляторе)

б) изолятор в неудовлетворительном состоянии (однозначная отбраковка – снижение несущей способности изолятора в 2,5 – 25 раз):

- наличие соизмеримых по интенсивности максимумов на СПМ в диапазонах частот: 1000-3000 Гц – первый и 4000 – 5000 Гц – второй;

- наличие одного максимума на СПМ в диапазоне частот 1000 – 2000 Гц;

- наличие соизмеримых по интенсивности максимумов на СПМ в диапазонах частот: 4000-5000 Гц – первый и 8000-10000 Гц – второй;

в) все оставшиеся случаи требуют обследования более точными методами: либо акустико-миссионного контроля (прибором ПАК-3М), либо ультра-звуковым методом (УЗНК).

1.3 Методика и принцип выявления дефектов

Метод основан на прямой взаимосвязи между механической прочностью и жесткостью (ее отображением является оценка спектральной плотности мощности колебаний (рисунок 3)) стержневых систем. Основным критерием сохранения работоспособности опорно-стержневого изолятора является неизменность во времени его прочности, аналогом значения которой является частотная характеристика, в частности оценки спектральной плотности мощности вибрационной реакции изолятора на воздействие возмущения типа «белый шум».

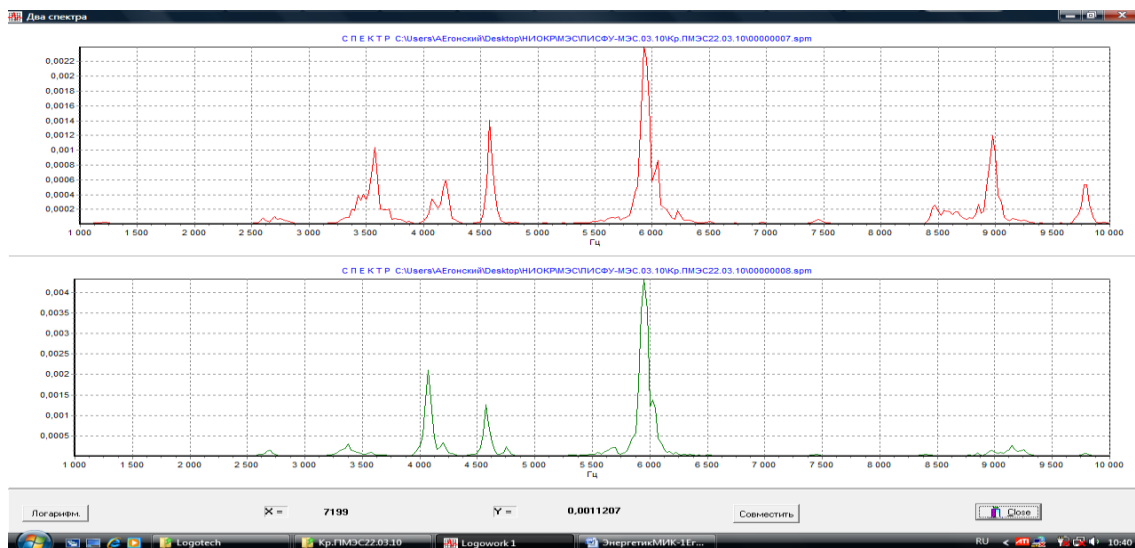


Рисунок 3 – Спектр плотности мощности

Нестабильность отношений максимумов величины СПМ в характерных диапазонах может приводить к неверной оценке состояния изолятора. В случае ремонта, отправки на поверку (используется другой прибор), приобретении нового прибора сложно сопоставлять новые замеры с имеющимися в базе замерами (проверка на неизменность частотной характеристики СПМ изолятора).

Достоинства:

- Малое время контроля
- Можно проводить испытания при отрицательной температуре
- Позволяет проводить обследование без отключения оборудования
- Изоляторы не разрушаются при испытаниях.

2 Анализ испытаний на подстанции «Казачья»

По инициативе общественного совета специалистов по диагностике Филиала ОАО «МРСК Урала» - «Челябэнерго» проводилась сравнительная оценка контроля механической прочности опорно-стержневых изоляторов различными методами [1].

Всего на ПС «Казачья» испытано 295 изоляторов следующими методами неразрушающего контроля:

- ультразвуковым (прибор УДС 2ВФ-ЦИВОМ-ЭП)
- виброакустическим – метод свободных колебаний (прибор «КОРСАР»)
- виброакустическим – метод вынужденных колебаний («прибор МИК-1»).

Обобщенный анализ результатов испытаний

Для получения объективной оценки применяемых методов контроля механического состояния фарфоровых опорно-стержневых изоляторов в таблице 1 приведены сводные результаты полевых испытаний комплексами «Корсар» и «УДС 2ВФ-ЦИВОМ-ЭП» полученные на первом этапе испытаний, комплексом «МИК-1» полученные на первом и втором этапе испытаний, комплексом «ПАК-3М» полученные на третьем этапе испытаний (провести испытания в полевых условиях не представилось возможным) и результаты разрушения изоляторов на стенде завода «Энергия 21».

Таблица 1 - Сводные результаты всех испытаний изоляторов

п/п	Изолятор	Присвоенный номер изолятору	Корсар	МИК-1, (по двум измерениям)	УЗНК	ПАК-ЗМ	Фактическая механическая прочность изолятора при изгибе	Примечание
1	ИОС 35-1000	3.1	Б	К	1С	Н	1090	Скол ребра
2	ИОС 110-600	3.2	Б	К	2С	Н	610	
3	ИОС 35-1000	4.1	Н	Б	1С	Н	1100	
4	ИОС 110-600	4.2	Н	Б	4С	Н	740	
5	ИОС 35-1000	5.1	Н	Б	2С	Н	1150	
6	ИОС 110-1250	5.2	Н	Б	1С	Н	1380	
7	ИОС 35-1000	6.1	К	Б	1С	Б	450	
8	ИОС 110-600	6.2	К	Б	4С	Н	590	
9	ИОС 35-1000	7.1	Н	К	1С	Н	1300	
10	ИОС 110-600	7.2	Н	К	4С	Н	710	
11	ИОС 35-1000	8.1	Н	К	1С	Б	450	Скол ребра
12	ИОС 110-600	8.2	Н	К	2С	Н	650	
13	ИОС 35-1000	15.1	Н	Б	2С	Б	850	
14	ИОС 110-1250	15.2	Н	Б	1С	Н	1500	
15	ИОС 35-1000	25.1	К	К	1С	Н	1050	
16	ИОС 110-1250	25.2	К	К	2С	Н	1440	
17	ИОС 35-1000	27.1	К	Б	1С	Н	740	
18	ИОС 110-1250	27.2	К	Б	2С	Н	1040	Вертикальная трещина нижнего фланца
19	ИОС 35-1000	29.1	Н	К	1С	Н	730	
20	ИОС 110-1250	29.2	Н	К	2С	Н	1500	
21	ИОС 35-1000	31.1	К	К	4С	Б	180	

п/п	Изолятор	Присвоенный номер изолятору	Корсар	МИК-1, (по двум измерениям)	УЗНК	ПАК-ЗМ	Фактическая механическая прочность изолятора при изгибе	Примечание
22	ИОС 110-1250	31.2	К	К	2С	Н	1150	
23	ИОС 35-1000	32.1	Б	К	1С	Б	1040	
24	ИОС 110-1250	32.2	Б	К	2С	Н	1490	
25	ИОС 35-1000	35.1	К	К	1С	Н	970	
26	ИОС 110-1250	35.2	К	К	1С	Н	1192	
27	ИОС 35-1000	36.1	Н	К	3С	Б	430	
28	ИОС 110-1250	36.2	Н	К	1С	Н	1780	
29	ИОС 35-1000	50.1	Н	К	1С	Н	980	
30	ИОС 110-1250	50.2	Н	К	5С	Н	870	Продольная трещина фарфора в верхней части
31	ИОС 35-1000	52.1	Н	К	1С	Н	830	
32	ИОС 110-1250	52.2	Н	К	2С	Н	1200	Вертикальная трещина нижнего фланца
33	ИОС 35-1000	57.1	К	К	4С	Н	850	
34	ИОС 110-1250	57.2	К	К	1С	Н	1470	
35	ИОС 35-1000	58.1	Н	К	2С	Б	820	
36	ИОС 110-1250	58.2	Н	К	1С	Н	1160	
37	ИОС 35-1000	59.1	Н	К	2С	Н	960	
38	ИОС 110-1250	59.2	Н	К	1С	Н	890	
39	ИОС 35-1000	60.1	Б	К	1С	Н	1150	
40	ИОС 110-1250	60.2	Б	К	3С	Н	1170	

п/п	Изолятор	Присвоенный номер изолятору	Корсар	МИК-1, (по двум измерениям)	УЗНК	ПАК-ЗМ	Фактическая механическая прочность изолятора при изгибе	Примечание
41	ИОС 35-1000	62.1	Н	К	1С	Н	940	
42	ИОС 110-1250	62.2	Н	К	3С	Н	1050	
43	ИОС 35-1000	63.1	Н	К	1С	Б	850	
44	ИОС 110-1250	63.2	Н	К	2С	Н	920	Вертикальная трещина с двух сторон нижнего фланца
45	ИОС 35-1000	64.1	Н	К	2С	Н	900	
46	ИОС 110-1250	64.2	Н	К	3С	Н	820	
47	ИОС 35-1000	65.1	К	К	1С	Н	1010	
48	ИОС 110-1250	65.2	К	К	3С	Б	840	
49	ИОС 35-1000	66.1	К	Б	1С	Н	830	
50	ИОС 110-1250	66.2	К	Б	1С	Н	1500	
51	ИОС 35-1000	69.1	-	Б	2С	Н	780	
52	ИОС 110-1250	69.2	-	Б	1С	Н	1500	
53	ИОС 35-1000	87.1	К	К	1С	-	-	Сломался при демонтаже
54	ИОС 110-1250	87.2	К	К	3С	Н	1170	
55	ИОС 35-1000	100.1	Б	Б	1С	Н	1200	
56	ИОС 110-1250	100.2	Б	Б	1С	Н	980	
57	ИОС 35-1000	102.1	Н	К	1С	Н	-	
58	ИОС 110-1250	102.2	Н	К	3С	Б	500	
59	ИОС 35-1000	103.1	Б	К	2С	Б	1120	

п/п	Изолятор	Присвоенный номер изолятору	Корсар	МИК-1, (по двум измерениям)	УЗНК	ПАК-ЗМ	Фактическая механическая прочность изолятора при изгибе	Примечание
60	ИОС 110-1250	103.2	Б	К	3С	Б	150	Скол третьего ребра
61	ИОС 35-1000	104.1	Б	К	2С	Н	790	Скол ребра
62	ИОС 110-1250	104.2	Б	К	3С	Н	650	
63	ИОС 35-1000	105.1	Н	Б	2С	Б	830	
64	ИОС 110-1250	105.2	Н	Б	3С	Б	200	
65	ИОС 35-1000	106.1	Н	К	1С	Б	600	
66	ИОС 110-1250	106.2	Н	К	3С	Б	398	
67	ИОС 35-1000	107.1	Н	К	1С	Н	780	
68	ИОС 110-1250	107.2	Н	К	3С	Б	350	
69	ИОС 35-1000	116.1	Б	Б	1С	Н	850	
70	ИОС 110-1250	116.2	Б	Б	1С	Н	1720	Вертикальная трещина нижнего фланца
71	ИОС 35-1000	117.1	К	К	3С	Н	910	
72	ИОС 110-1250	117.2	К	К	2С	Н	1500	
73	ИОС 35-1000	118.1	Н	К	1С	Б	570	
74	ИОС 110-1250	118.2	Н	К	1С	Б	1070	
75	ИОС 35-1000	124.1	Б	К	1С	-	-	Сломался при демонтаже
76	ИОС 35-1000	129.1	Б	К	1С	-	-	Сломался при демонтаже
77	ИОС 110-1250	129.2	Б	К	3С	Б	1070	
78	ИОС 35-1000	131.1	Н	Б	1С	Н	920	

п/п	Изолятор	Присвоенный номер изолятору	Корсар	МИК-1, (по двум измерениям)	УЗНК	ПАК-ЗМ	Фактическая механическая прочность изолятора при изгибе	Примечание
79	ИОС 110-1250	131.2	Н	Б	1С	Н	1150	трещина нижнего фланца
80	ИОС 35-1000	133.1	К	К	1С	Н	770	
81	ИОС 110-1250	133.2	К	К	1С	Н	1200	Вертикальная трещина нижнего фланца
82	ИОС 35-1000	135.1	К	К	1С	Н	1140	
83	ИОС 110-1250	135.2	К	К	3С	Б	410	
84	ИОС 35-1000	136.1	К	К	1С	Н	1000	Скол ребра
85	ИОС 110-1250	136.2	К	К	3С	Б	450	
86	ИОС 35-1000	137.1	Н	Б	1С	Н	910	
87	ИОС 110-1250	137.2	Н	Б	3С	Б	600	Разрушение армировочного шва верхнего фланца
88	ИОС 35-1000	139.1	Б	К	1С	Н	940	
89	ИОС 110-1250	139.2	Б	К	3С	Н	980	
90	ИОС 35-1000	140.1	Б	К	1С	Н	1370	
91	ИОС 110-1250	140.2	Б	К	1С	Н	1210	Скол первого ребра
92	ИОС 35-1000	157.1	Н	К	3С	Б	860	
93	ИОС 110-1250	157.2	Н	К	1С	Н	1250	Вертикальная трещина верхнего фланца

п/п	Изолятор	Присвоенный номер изолятору	Корсар	МИК-1, (по двум измерениям)	УЗНК	ПАК-3М	Фактическая механическая прочность изолятора при изгибе	Примечание
94	ИОС 35-1000	161.1	Б	К	2С	Н	1145	
95	ИОС 110-1250	161.2	Б	К	1С	Н	1140	

*Примечание: прочерками обозначено отсутствие результатов (испытания не проводились по разным причинам).

Таблица 2 – Сравнительные данные о результатах всех испытаний для разных групп изоляторов

Заключение по результатам испытаний	Испытано изоляторов, %					
	Группа изоляторов	Корсар	МИК-1	УДС 2ВФ-ЦИВОМ-ЭП	ПАК-3М	Испытания на излом
Брак	все	24,7	23,2	7,4	28,5	15,8
	110 кВ	23,9	23,4	10,6	23,4	17
	35 кВ	25,5	23	4	33,4	14,6
Контроль	все	28,3	76,6	34	-	49
	110 кВ	28,3	76,6	34	-	49
	35 кВ	27,7	77	6	-	56,2
Норма	все	47,8	-	55,4	76,6	34
	110 кВ	47,8	-	55,4	76,6	34
	35 кВ	46,8	-	90	66,6	29,2

На основе проведенных испытаний были сделаны следующие выводы:

1. Ни один из рассмотренных методов оценки механического состояния опорно-стержневых изоляторов не может быть признан абсолютным, так как не дает 100%-й гарантии разбраковки изоляторов на работоспособные и дефектные при испытаниях в полевых условиях (на подстанции).

2. Акустико-эмиссионный метод испытания («ПАК-3М») является предпочтительным при испытаниях изоляторов во время капитального ремонта оборудования (с демонтажем изоляторов с разъединителей).

3. Виброакустический метод («МИК-1») является предпочтительным для оперативного контроля состояния изоляторов, поскольку позволяет проводить обследование без отключения оборудования.

4. Ультразвуковой метод («УДС 2ВФ-ЦИВОМ-ЭП») является предпочтительным при входном контроле перед монтажом изоляторов на оборудование, а также для уточнения причин повреждения изоляторов в эксплуатации.

5. Метод свободных колебаний («Корсар») может быть рекомендован для внедрения в эксплуатацию после доработки технологии контроля и уточнения диагностических критериев.

6. Для повышения достоверности оценки механического состояния опорно-стержневых изоляторов необходимо проводить контроль несколькими методами.

7. Целесообразно провести испытания всех оставшихся изоляторов на стенде завода «Энергия+21», после демонтажа их с разъединителей ПС «Казачья».

8. Целесообразно продолжить работы по сравнению эффективности различных методов оценки механической прочности опорно-стержневых изоляторов и поручить эту работу НТЦ Энергетики.

3 Анализ достоверности комплекса МИК-1

На основе результатов, полученных при исследовании опорно-стержневых изоляторов на подстанции «Казачья», был проведен анализ достоверности комплекса МИК-1 [2].

Таблица 3 – Анализ сводных результатов всех испытаний изоляторов комплекса МИК-1

Излишне забракованные		Поставленные на контроль		Не забракованные	
№изол.	Марка изолятора	№изол.	Марка изолятора	№изол.	Марка изолятора
3	ИОС 35-1000	1	ИОС 35-1000	11	ИОС 35-1000
4	ИОС 110-600	2	ИОС 110-600	21	ИОС 35-1000
5	ИОС 35-1000	9	ИОС 35-1000	27	ИОС 35-1000
6	ИОС 110-1250	10	ИОС 110-600	53	ИОС 35-1000 (С)
8	ИОС 110-600 (К)	12	ИОС 110-600	58	ИОС 110-1250
13	ИОС 35-1000 (К)	15	ИОС 35-1000	60	ИОС 110-1250
14	ИОС 110-1250	16	ИОС 110-1250	66	ИОС 110-1250
17	ИОС 35-1000 (К)	20	ИОС 110-1250	68	ИОС 110-1250
18	ИОС 110-1250 (К)	23	ИОС 35-1000	75	ИОС 35-1000 (С)
49	ИОС 35-1000 (К)	24	ИОС 110-1250	76	ИОС 35-1000 (С)
50	ИОС 110-1250	28	ИОС 110-1250	83	ИОС 110-1250
51	ИОС 35-1000 (К)	34	ИОС 110-1250	85	ИОС 110-1250
52	ИОС 110-1250	37	ИОС 35-1000		

55	ИОС 35-1000	39	ИОС 35-1000		
56	ИОС 110-1250 (К)	57	ИОС 35-1000		
63	ИОС 35-1000 (К)	59	ИОС 35-1000		
69	ИОС 35-1000 (К)	72	ИОС 110-1250		
70	ИОС 110-1250	82	ИОС 35-1000		
78	ИОС 35-1000 (К)	84	ИОС 35-1000		
79	ИОС 110-1250(К)	90	ИОС 35-1000		
86	ИОС 35-1000 (К)	93	ИОС 110-1250		
		94	ИОС 35-1000		

*Примечание: (К) – излишне поставленные на контроль, хотя все показатели в норме; (С) – изолятор сломан при испытаниях.

Таблица 4 – Сравнительные данные по испытаниям в лаборатории и комплексом МИК-1

В лаборатории определили как неисправные, шт(%)	15(15,8)
МИК-1 определил как брак	3(3,2)
МИК-1 поставил на контроль	12(12,6)

Таблица 5 – Сравнительные данные по испытаниям в лаборатории и комплексом МИК-1

В лаборатории определили как в норме, шт(%)	31(32,6)
МИК-1 определил как брак	22(23,2)
МИК-1 поставил на контроль	9(9,5)

Таблица 6 – Сравнительные данные по испытаниям в лаборатории и комплексом МИК-1

В лаборатории поставили на контроль, шт(%)	48(50,5)
МИК-1 определил как брак	12(12,6)
МИК-1 поставил на контроль	36(37,9)

Определим достоверность комплекса МИК-1 по полученным данным, %

$$n = \frac{m - p}{m} \cdot 100\%,$$

где m – общее количество изоляторов, шт; p – количество изоляторов, которые МИК-1

излишнезабраковал, поставил на контроль или не забраковал.

$$n = \frac{95 - 55}{95} \cdot 100\% = 42,$$

$$n = \frac{m - k}{m} \cdot 100\%,$$

где k – количество изоляторов, которые МИК-1 излишнезабраковал или не забраковал.

$$n = \frac{95 - 33}{95} \cdot 100\% = 65.$$

4 Затраты предприятия при использовании комплекса МИК-1

К работе комплексом МИК-1 допускается персонал, прошедший обучение и аттестованный изготовителем аппаратуры виброакустического контроля. Всего на подстанции около 1000 изоляторов.

Бригада должна состоять из двух человек. Условно примем заработную плату рабочего 25000 рублей.

Приближённый расчет затрат предприятия:

$$Z = M + Zn \cdot \square + P,$$

где M – стоимость комплекса МИК-1, $M = 200000$ рублей, Zn – заработная плата одного работника, \square – число работников, P – прочие расходы, которые включают все командировочные расходы (транспорт, столовая, гостиница и другое).

Определим прочие расходы на предприятии на одного человека, тыс. руб.:

Предполагаем, что половину месяца рабочие проводят в командировке, что составляет 13 рабочих дней.

$$P = C \cdot \square + \square,$$

где C - расходы предприятия на одного рабочего за сутки (гостиница и столовая), $C \approx 2500$ руб; \square - число дней; \square - транспортные расходы, $\square \approx 1200$ руб.

$$P = 2500 \cdot 13 + 1200 = 33700.$$

Так как в бригаде работают два человека, прочие затраты составят 67400 рублей.

$$Z = 200000 + 25000 \cdot 2 + 67400 = 317400.$$

Мы провели анализ и поверочные расчеты и сделали следующие выводы:

- Достоверность комплекса МИК-1, которая составила 65%, является очень маленькой, но этот комплекс обладает рядом преимуществ, по сравнению с другими методами контроля, которые были приведены ранее в тексте.

- Сравнительные данные по испытаниям в лаборатории и комплексом МИК-1 совпадают с данными исследования на подстанции «Казачья».

Список литературы

1 О виброакустическом методе контроля изоляторов. Егонский А.А., Вепринцев В.И., Львов Е.В. В сборнике материалов Международной науч.-практ. конф. Посвящ. 70-летию Виктора Соколова/ под ред. А.Г. Овсянникова, В.Н. Осотова. Екатеринбург: Издательский дом «Автограф», 2010.-232 с.

2 «Методические указания по контролю механического состояния опорно-стержневых фарфоровых изоляторов 35-500 кВ под рабочим напряжением комплексом МИК-1». г. Снежинск. 2013 г.