Третья Российская
с международным участием
научно-практическая конференция
Новосибирск

ЛЭП 2008

Линии электропередачи 2008:
проектирование, строительство
опыт эксплуатации и
научно-технический прогресс

КОМПЛЕКС РАБОТ И ПРЕДЛОЖЕНИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ НАДЕЖНОСТИ ВЛ НА СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ

Яковлев Л.В. **Каверина Р.С., Дубинич Л.А.**

Рассмотрены причины повреждения различных элементов ВЛ (опор, линейной изоляции, фундаментов опор, проводов, линейной арматуры, грозозащитных тросов). Предложены основные мероприятия по повышению эксплуатационной надежности ВЛ, которые необходимо предусмотреть как на стадии проектирования воздушной линии электропередачи, так и на стадии эксплуатации.

1. Общие вопросы состояния ВЛ.

Надежность работы ВЛ обусловлена совокупностью ряда факторов. Выявить истинные причины отказов ВЛ и наметить пути их совершенствования можно только на основании статистических данных о повреждаемости элементов ВЛ. Отказы являются единственным критерием проверки правильности практических решений и теоретических предпосылок.

Анализ возникших проблем с передачей электроэнергии в России показывает, что имеющиеся в последнее время массовые повреждения ВЛ, вызваны в определяющей мере старением основных фондов. В настоящее время в эксплуатации находится около 500 тыс. км линий 35-500кВ на металлических, железобетонных и деревянных опорах. Основная масса этих линий была построена в 60-70 годах прошлого столетия. При их проектировании исходили из срока службы 30 лет. На основе этого они проектировались на нормативные нагрузки с повторяемостью 10-15 лет (расчетные 25-50 лет). Долговременность защиты от коррозии, износа от знакопеременных нагрузок, старение материалов, были рассчитаны на эти же сроки. Доля линий со сроком эксплуатации более 30 лет неуклонно растет, так как нового строительства и реконструкции ВЛ с 1991 года практически не ведется.

Протяженность ВЛ на металлических опорах составляет 25%, на железобетонных –57% и на деревянных –18% от общей протяженности линий.

Протяженность ВЛ 35-500 кВ по напряжениям и количеству цепей приведена в табл.1

Таблица 1

Напряжение, кВ	Всего по трассе, тыс. км	Одноцепные ВЛ на опорах			Двухцепные ВЛ на опорах		
		Металлических	Железобетонных	Деревянных	Металлических	Железобетонных	Деревянных
500	30,0	26,0	4,0	-			-
330	9,0	3,5	4,7	-	0,7	0,1	-
220	74,0	26,2	29,6	2,8	13,8	1,6	-
110	203,0	16,3	89,3	36,5	24,4	36,5	-
35	184,0	5,6	111,2	51,2	3,7	11,0	-
Всего	500,0	77,6	239,8	90,8	42,6	49,2	-

Высоковольтные линии имеют средний срок эксплуатации на 01.01.2001 г. на опорах: металлических - 36,6 лет; железобетонных - 25,1 года; деревянных - 41,4 года.

Приведенные данные по срокам эксплуатации указывают на масштабное старение высоковольтных линий, что ведет к недопустимому их износу. Например, по данным «Института Энергосетьпроект» износ ВЛ составляет 36%, что привело к увеличению числа отказов. В настоящее время количество отказов по всем элементам ВЛ продолжает возрастать, и за последние 10 лет оно увеличилось в 1,6 раза. Состояние ВЛ 35-500 кВ за период с 1996 г. характеризуется данными, приведенными табл.2.

Таблица 2

Количество отказов ВЛ 35-500 кВ с 1996 г. по 2003 г.

1996 г.	1997 г.	1998 г.	1999 г.	2000 г.	2001-2003 гг.
2344	2694	3797	3750	3687	3000-4000

Данные, приведенные в этой таблице показывают:

- с 1996 года по 2000 год наблюдался значительный рост отказов (в 1,6 раза);
- в последующие годы, в результате активизации ремонтных работ, темп роста отказов начал постепенно снижаться, но достигнутый уровень снижения отказов недостаточен.

Фирма ОРГРЭС с 50-х годов ведет анализ причин технологических нарушений в работе энергосистем, который позволил классифицировать отказы ВЛ., и в частности отказы, вызванные нарушением работоспособности отдельных элементов ВЛ.

Анализ отказов элементов ВЛ показывает, что опоры являются достаточно надежным элементом линий электропередачи. Значительное число отказов ВЛ является следствием повреждения проводов, изоляторов, и отключения от грозовых перенапряжений. Только 9-13% случаев отказов связано с повреждением элементов опор. Однако разрушения опор имеют наиболее тяжелые последствия для линий электропередачи и приводят к большим затратам, связанным с восстановлением ВЛ и недоотпуском электроэнергии. Распределение отказов по элементам ВЛ приведены в табл.3.

Таблица 3

Наименование элемента ВЛ	Поток отказов в % от общего количества	
	С учетом грозовых перенапряжений	Без учета грозовых перенапряжений
Опоры	9	13
Провода и тросы	37	52
Изоляторы	23	31
Арматура	3	4
Грозовые перенапряжения	28	0

2. Надежность опор и фундаментов ВЛ.

Анализ причин отказов ВЛ, проведенный Донбасской Академией Строительства и Архитектуры и другими исследовательскими учреждениями показывают, что интенсивность отказов зависит от срока их службы. Эта зависимость для ВЛ 35-330 кВ на металлических опорах, которые в основном были сооружены в 60-70 годы в южной части СССР иллюстрируется графиком, приведенным на рис.1.

Опоры ВЛ этого периода (до введения СНиП 11-В, 3-62, который в настоящее время отменен) характеризуются следующими техническими данными: конструкции опор выполнялись в основном сварными из кипящей стали, имеющую повышенную склонность к трещинообразованию и хрупкому разрушению при отрицательной температуре. Имелся и ряд других недостатков, например, в конструктивном решении стыков между сварными секциями в виде односторонних накладок, защита от коррозии выполнялась лакокрасочными покрытиями.

Параметр потока отказов для таких конструкций за первые 4 года эксплуатации понижался, а между 4-12 годами (8 лет) повышался (период приработки конструкций ВЛ), а

затем между 12-25 годами (13 лет) стабилизировался. В дальнейшем параметр потока отказов из-за износа и старения элементов ВЛ возрастал, вплоть до момента проведения капитального ремонта или реконструкции ВЛ.

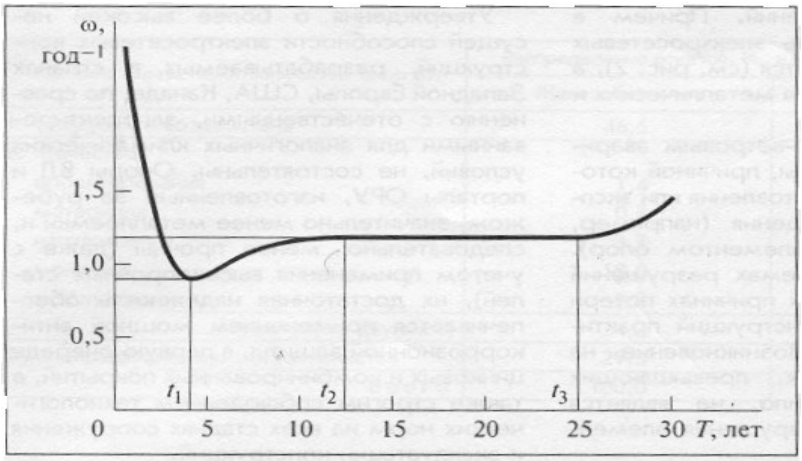


Рис. 1. Изменение потока отказов во времени для ВЛ на металлических опорах

После введения СНиП 11-В,3-62 и применения унификации опор, прежняя их конструкция была пересмотрена на основе применения сталей повышенного качества (спокойной плавки), применения болтовых опор и цинкования, изменения конструкции стыка (двойные накладки) и т. д.

Распределение количества отказов опор ВЛ в СССР по данным ОРГРЭС, с учетом проведенных усовершенствований на стадии проектирования, приведено на рис.2.

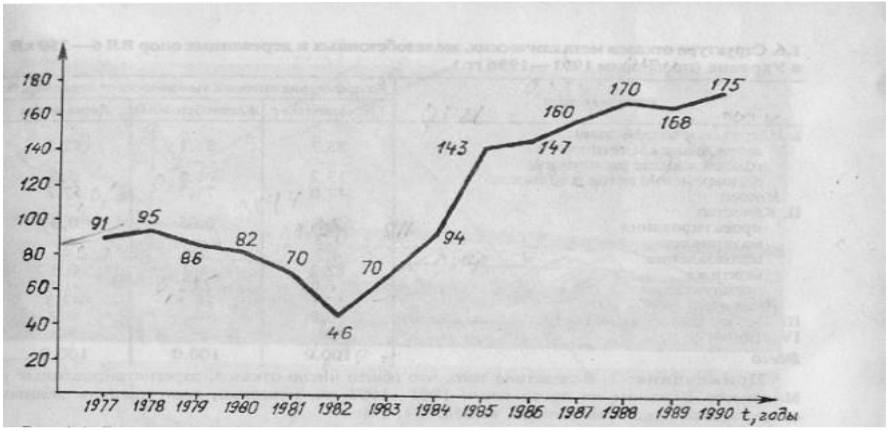


Рис.2. Распределение числа отказов электросетевых конструкций по годам (в знаменателе – параметры потока отказов).

На период с 1981 по 1983 г. средний срок эксплуатации ВЛ составил примерно 20 лет, количество отказов строительных конструкций ВЛ на этот срок минимальный, в пределах 50-90 отказов, далее количество отказов увеличилось, и к 1990-1991 годам составило 170-175 отказов в год. К этому времени средний срок службы опор ВЛ составлял более 30 лет.

На период с 1958 по 1976 год средний срок эксплуатации не превышал 25 лет, и поэтому в этом интервале не наблюдалось характерного повышения потока отказов. В период с 1976 по 1982 год (6 лет) поток отказов резко понижается. Эти годы характеризуются массовым вводом в эксплуатацию новых линий (до 15 тыс. км в год против 1,5-2,0 тыс. км в год в прежние годы). Затем с 1982 по 1992 год (10 лет) повышается до уровня периода начала приработки (1976 год), а затем продолжает постепенно расти вплоть

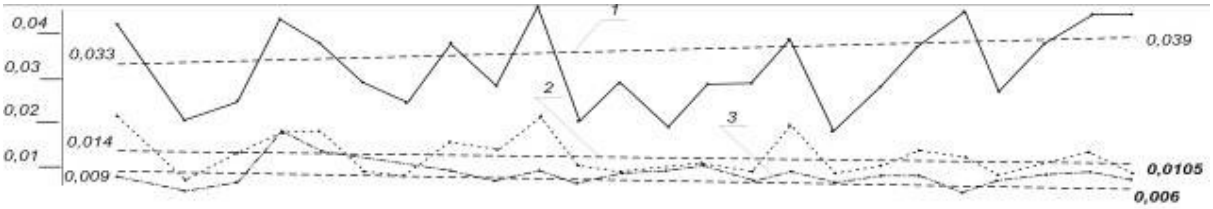
до 2000 года. В классическом графике (рис.1) он стабилизируется, так как в этот период практически не проводились капитальные ремонты и реконструкции. С 2000 года поток отказов начал стабилизироваться, так как с этого времени оживился процесс ремонта и реконструкции ВЛ. Параметр потока отказов на начало 2000 г. от сверхрасчетных нагрузок составляет:

- для железобетонных опор со сроком службы 50-60лет - 0,0105:
- для металлических опор со сроком службы 30-35лет - 0, 0129
- для деревянных опор со сроком службы 10-15 лет – 0,11.

Исходя из графика, приведенном на рис.2, можно сделать следующие выводы:

- повреждаемость опор носит износовый характер, ее величина определяется нормами проектирования, материалом из которого изготовлены опоры, уровнем обслуживания при эксплуатации (качеством оценки технического состояния и проведения необходимых ремонтов);
- период до капитального ремонта металлических опор запроектированных по действующим СНиП и ПУЭ составляет порядка 30-35 лет;
- уровень отказов очень высок, еще не стабилизировался и превышает установившийся уровень 60-70 годов в 1,9-2,0 раза.

Результаты анализа надежности опор на основе статистических данных, полученных за период с 1958 года по 1989 г. в зависимости от материала, из которого они изготавливаются, приведены на рис.4 и 5.



Годы		1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	А	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	Б	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	В
Общее число отказов		0,042	0,02	0,025	0,047	0,039	0,029	0,026	0,039	**0,033**	0,029	0,05	0,0203	0,03	0,02	0,03	0,03	0,04	**0,031**	0,02	0,03	0,04	0,05	0,03	0,04	0,05	0,05	**0,039**
Число	От расчетных нагрузок	0,0207	0,006	0,015	0,0178	0,018	0,0083	0,005	0,018	**0,014**	0,015	0,023	0,0164	0,0076	0,0088	0,0112	0,0098	0,021	**0,012**	0,0098	0,0085	0,0148	0,0124	0,0094	0,0102	0,0145	0,0066	**0,0105**
	От дефекта монтажа, изготовления	0,0079	0,002	0,003	0,0179	0,0118	0,0113	0,01	0,0068	**0,009**	0,0038	0,0063	0,0033	0,0076	0,0095	0,0105	0,0053	0,052	**0,006**	0,0035	0,0068	0,006	0,0018	0,0059	0,0071	0,0098	0,0049	**0,006**
	От прочих причин	0,0134	0,012	0,007	0,0113	0,0092	0,0094	0,0053	0,0122	**0,01**	0,0102	0,0207	0,0086	0,0146	0,0105	0,0083	0,0149	0,0139	**0,013**	0,0063	0,0147	0,0192	0,035	0,0147	0,0227	0,0257	0,0365	**0,022**

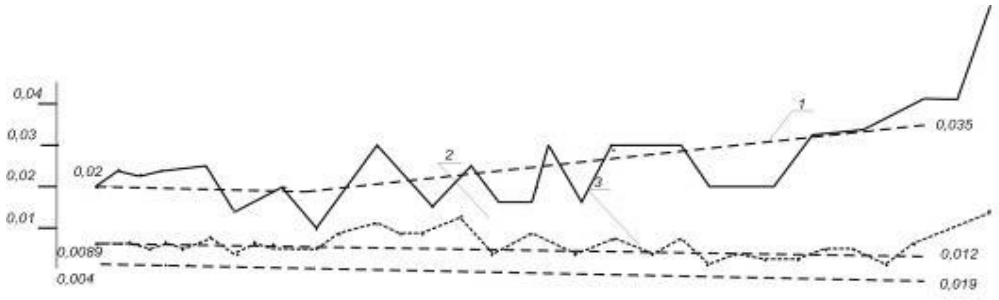
Рисунок 4 Изменение удельного числа отказов железобетонных опор с 1966 по 1989 г.

1 - Общее число отказов;
2 - число от расчетных нагрузок;
3 - число от дефектов изготовления и монтажа (прочие причины отказов: недостатки эксплуатации, изменение свойств материала, наезды транспорта, ледоход, наводнения, оползни);
А, Б и В - средние значения показателей соответственно на 1966 - 1973 , 1974 - 1981 и 1982 - 1989 г.г.

Из рис.4 видно, что железобетонные опоры находятся в периоде стабильного состояния, и повреждаемость в течение последних 16 лет находится примерно на одном уровне. Металлические опоры (рис.5) к этому периоду находятся под влиянием износового фактора. Повреждаемость их, начиная с 1974 года, постоянно увеличивается, и практически сравнялась с железобетонными опорами. В начальном периоде эксплуатации повреждаемость металлических опор в 1,5 раза ниже железобетонных опор.

Основная причина значительной разницы в повреждаемости между металлическими и железобетонными опорами заключается в сильной зависимости несущей способности последних от качества заделки их в грунте. Часто железобетонные опоры под действием внешних нагрузок приобретают крен. Это создает дополнительный изгибающий момент в стойке опоры, вызванный значительной собственной массой конструкции, способствующий дальнейшему увеличению наклона. В результате этого, несущая способность железобетонных опор резко

снижается, что приводит к их разрушению. Доля изгибающего момента от вертикальных нагрузок достигает в гололедных районах порядка 35%, а при слабой заделке опор 50% и более. Влияние гололедных нагрузок на надежность железобетонных опор иллюстрируется табл.4, в которой отказы от гололедно - ветровых нагрузок превышают значения для металлических опор в 1,9 раза.. К сожалению, эксплуатирующие организации мало уделяют внимание этому фактору.



Годы		1958	1959	1960	1961	1962	1963	1964	1965	А	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	Б	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	В	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	Г
Общее число отказов		0,02	0,025	0,01	0,022	0,009	0,024	0,006	0,012	0,02	0,021	0,01	0,02	0,03	0,02	0,013	0,022	0,015	0,019	0,017	0,029	0,017	0,03	0,03	0,03	0,02	0,01	0,024	0,02	0,03	0,03	0,03	0,02	0,04	0,04	0,07	0,035
Числа	От расчетных нагрузок	0,008	0,01	0,009	0,010	0,004	0,006	0,012	0,014	0,009	0,01	0,003	0,012	0,016	0,02	0,0075	0,0137	0,007	0,0094	0,0052	0,0165	0,007	0,017	0,0095	0,0112	0,0055	0,010	0,011	0,006	0,014	0,013	0,004	0,016	0,04	0,0196	0,024	0,0129
	От дефектов монтажа, изготовления	0,009	0,01	0,009	0,009	0,004	0,006	0,006	0,004	0,007	0,004	0,001	0,0024	0,0034	0,0042	0,0021	0,0022	0,0043	0,0063	0,0038	0,0025	0,007	0,006	0,0073	0,0027	0,0022	0,002	0,0035	0,0021	0,024	0,006	0,001	0,0036	0,0022	0,016	0,006	0,0045	0,0035
	От прочих причин	0,003	0,05	0,006	0,005	0,001	0,012	0,002	0,002	0,004	0,007	0,006	0,0096	0,0104	0,0094	0,0028	0,0041	0,005	0,0063	0,0076	0,009	0,009	0,007	0,013	0,014	0,012	0,008	0,0095	0,012	0,021	0,01	0,016	0,012	0,022	0,014	0,041	0,019

Рисунок 5 Изменение удельного числа отказов металлических опор с 1958 по 1989 г.

1 - Общее число отказов;
2 - число от расчетных нагрузок;
3 - число от дефектов изготовления и монтажа (прочие причины отказов: недостатки эксплуатации, изменение свойств материала, наезды транспорта, ледоход, наводнения, оползни);
А, Б, В и Г - средние значения показателей соответственно на 1958- 1965 , 1966 - 1973 и 1974 - 1981 и 1982 - 1989 г.г.

Другая причина пониженной надежности железобетонных опор в период приработки - большое число скрытых дефектов. К таким дефектам, в первую очередь, следует отнести обрывы арматуры, отклонения от проектного армирования, несоответствие классов бетона и стали расчетным, пустоты и раковины в теле бетона и др. Влияние этих дефектов показано в таблице 4, где отказы по этим причинам составляют 35,5%.

Таблица 4

Причина отказов	Распределение отказов в зависимости от вида опор, %		
	Металлические	Железобетонные	Деревянные
1. Нагрузки и воздействия:			
ветер выше расчетного	33,7	21,7	52,2
ветер и гололед выше расчетного	13,2	24,8	5,0
Итого	47,0	46,5	57,2
2. Качество проектирования строительства и монтажа	9,2	35,5	1,5
3. Качество эксплуатации	26,9	18,0	41,0
4. Разбор конструкций посторонними лицами	16,9	-	0,3
Всего:	100%	100%	100%

Наличие трещин в стойках опор на надежность в настоящее время не сказывается, так как процесс коррозии арматуры не достиг критического значения. Судя по опыту применения железобетонных опор в Калининградской области (начало применения 1932 г.) влияние коррозии арматуры начнет сказываться после 50-60 лет эксплуатации. Поэтому ремонт по закрытию трещин является актуальным, так как в дальнейшем это скажется на надежности.

Указанные недостатки снизили надежность железобетонных опор по сравнению с металлическими опорами в начальной стадии эксплуатации, а из-за большого срока службы в конечном итоге увеличило их надежность. Мнение о недостаточной надежности железобетонных опор не подтверждается статистическими данными. Однако их применение в гололедных районах и в лессовидных грунтах из-за слабой заделки должны быть ограничены. Актуально в настоящее время применение новых технологий и конструкций заделок опор на основе буронабивных и забивных свай. Такие конструкции разработаны и находятся в стадии опытного применения.

Крен металлических конструкций из-за неудовлетворительного закрепления в грунте наблюдается весьма редко, а большинство дефектов и повреждений выявляются в процессе профилактических проверок и осмотров. Поэтому основная причина разрушения металлических опор это превышение реальных нагрузок и воздействий, и коррозионный износ элементов при длительной эксплуатации. К вышесказанному необходимо добавить, что преобладают отказы износового характера при сверхрасчетных нагрузках. Об этом свидетельствует то, что число случаев, в которых причиной отказов является только ураганный ветер имеет срок эксплуатации 10-15 лет и при этом количество конструкций, которые эксплуатировались менее 10 лет не превышает 15% от общего.

К наибольшему числу отказов ВЛ 35-500 кВ в расчете на 100 км трассы приводят повреждения деревянных опор. Количество нарушений в работе деревянных опор на порядок выше, чем у конструкций из других материалов. При практически одинаковых внешних воздействиях высокий уровень повреждаемости ВЛ на деревянных опорах может быть объяснен низким сроком службы (7-15 лет), вызванный значительной потерей прочности, вследствие загнивания и невозможностью своевременного его устранения.

Утверждения о более высокой несущей способности опор, создаваемых в странах Западной Европы, США, Канады, по сравнению с отечественными, запроектированными для аналогичных климатических условий не состоятельны. Опоры ВЛ и порталы ОРУ, изготовленные за рубежом, значительно менее металлоемки и, следовательно, менее прочны (даже с учетом применения высокопрочных сталей). Достаточная надежность при этом обеспечивается за счет применения мощной антикоррозионной защиты, в первую очередь цинкования и комбинированных покрытий, а также строгого соблюдения технологических норм на всех стадиях строительного производства и эксплуатации.

Возникший новый вид отказов от вандализма довольно сильно снизил надежность металлических опор. В эксплуатации часто высказываются предложения создавать опоры ВЛ, которые могли бы воспринимать заданную нагрузку даже при демонтаже нескольких элементов. Однако задача проектировщика — разработать максимально экономичную конструкцию при соблюдении требований действующих нормативных документов, т.е. добиться минимума приведенных затратах и обеспечить минимально необходимую прочность. Многократное же резервирование и введение дополнительных элементов исключительно для обеспечения устойчивости сооружения при несанкционированном вмешательстве в его работу приведет лишь к увеличению стоимости ВЛ и едва ли предотвратит аварии и отказы. Однако переход на новые конструктивные решения позволят практически полностью исключить отказы ВЛ от вандализма. Так, например, применение железобетонных опор полностью исключил фактор вандализма (табл.4). К таким решениям можно отнести применение металлических многогранных опор.

Указанные недостатки опор, в том числе и других элементов ВЛ можно предотвратить только на основе современной диагностики их технического состояния.

Диагностика является неотъемлемой частью технического перевооружения. Существующая система диагностики состояния оборудования электрических сетей не эффективна, это связано как с отсутствием на объектах электрических сетей технических средств, так и недостаточностью нормативно методической базы по всему спектру возможных систем диагностики. К решению этого вопроса необходимо привлечь ОРГРЭС, как организацию, имеющую обширный теоретический и практический опыт в этом направлении.

Разрушения элементов опор составляют:

- ствол опоры - 60%;

- узлы крепления с фундаментом и самих фундаментов, заделок железобетонных опор, оттяжек - 35%

- разрушение деревянных опор – 5%, (от возгорания)

Структура отказов показывает на очередность проведения мероприятий по повышению надежности:

- повышение нагрузок от ветра и гололеда на стадии проектирования нового строительства и реконструкции старых сетей. Проведение перерасчета опор старой унификации на нагрузки ПУЭ 7-го издания и создания новой унификации опор.

- повышение качества эксплуатации на основе улучшения диагностики состояния элементов опор и проведения своевременного ремонта. Своевременное техническое перевооружение и реконструкция являются основой повышения надежности на стадии эксплуатации.

- сооружение опор, не позволяющих проведения актов вандализма, что позволит снизить аварийность на 17%.

Повреждаемость опор в первую очередь зависит от срока их службы и применения прогрессивных технических решений и современных технологий и материалов. Исходя из этого, в перечень первоочередных проектов, необходимо включить разработку унифицированных конструкций опор на базе многогранных опор, позволяющих проводить сооружение новых линий и реконструирование старых с учетом проведения технического перевооружения и реконструкции во всех климатических районах с необходимым уровнем надежности от внешних воздействий. Так же при проектировании опор необходимо обеспечивать стойкость к вандализму.

Актуальность и необходимость технического перевооружения ВЛ продиктовано физическим и моральным износом электрических сетей, необходимостью повышения их пропускной способности.

Моральный износ вызван техническим старением в результате научно-технического прогресса, а физический износ – отработкой ВЛ срока эксплуатации (рис.6-8). Проблемы морального износа решаются техническим перевооружением, а физического – реконструкцией и капитальным ремонтом.

К настоящему времени назрела необходимость в коренном обновлении электрических сетей, создании линий нового поколения, отвечающих экономико-экологическим требованиям и современному техническому уровню по долговечности и надежности.

Одним из направлений развития электрических сетей является применение новых конструкций и материалов, позволяющих довести срок службы вновь строящихся и реконструируемых линий до 70 и более лет.

Среди новых конструкций для ВЛ рассматривается применение стальных многогранных оцинкованных опор закрытого профиля, устанавливаемых на буронабивных, а в пучинистых грунтах – шпунто-забивных фундаментах. Многогранные опоры имеют ряд существенных преимуществ по сравнению с решетчатыми металлическими и железобетонными конструкциями. Технологичны при изготовлении и монтаже, позволяют в короткие сроки строить и восстанавливать ВЛ. Долговечны за счет обтекаемой формы, отсутствия мест скопления влаги и невозможности проявления фактора вандализма.

При проведении комплексного технического перевооружения предлагается создание унифицированных опор.

За основу конструктивных решений по унификации металлических опор предлагаются многогранные опоры на базе одного модуля, позволяющего собирать одностоечные и портальные свободностоящие опоры и на оттяжках для ВЛ напряжением 35-750 кВ.

Рис.6 Характерные разрушения металлических опор

Рис.7 Характерные разрушения фундаментов металлических опор

Рис.8 Характерные разрушения железобетонных опор

Применение унифицированных многогранных стальных опор на базе модуля для ВЛ напряжением 35-750 кВ позволит:

- снизить расход металла до 20% по сравнению с решетчатыми конструкциями из-за применения в конструкции преднапряженных телескопических и фланцевых стыков, современной технологии гнутья листовой и фасонной стали;
- снизить стоимость сооружений новых ВЛ на 5 – 10% по сравнению с ВЛ с решетчатыми конструкциями опор;
- снизить объем запаса строительных конструкций для ликвидации аварий на существующих ВЛ до минимума, который по количеству типоразмеров сведется к одному модулю с комплектующими деталями, обеспечить создание компактных складов аварийного резерва в любых МЭС или энергосистеме, не требующих полного набора всей номенклатуры установленных опор ВЛ 35-750 кВ;
- сократить время и трудозатраты на ремонтно-восстановительные работы, так как опоры собираются из готовых секций;
- обеспечить доставку опор в труднодоступные места, так как секции опор имеют небольшие вес и габариты;
- исключить затраты, связанные с временной установкой и последующей заменой опор, так как опоры рассчитаны на рабочие ветровые и гололедные нагрузки и устанавливаются в постоянную эксплуатацию;
- исключить ущерб от вандализма, который составляет 15 и более % от общего количества отказов ВЛ с решетчатыми опорами.

При разработке проектов необходимо уделить основное внимание на защиту металлоконструкций от коррозии: применение горячего цинкования при сооружении новых линий и комбинированных покрытий при ремонте старых. Заделка железобетонных и

узкобазых металлических опор должна быть мало деформируемой и осуществляться в основном на буронабивных и забивных свайных основаниях

Работы в этом направлении только начаты и необходимо их форсировать.

3. Надежность проводов, грозозащитных тросов ВЛ.

Как показывает распределение отказов по элементам ВЛ, приведенные в табл.3 технологические нарушения на ВЛ, связанные с выходом проводов и грозозащитных тросов составляет от 40% до 55% от общего количества всех нарушений.

Основные причины повреждения проводов и грозозащитных тросов - превышение гололедных нагрузок, износ от действия вибрации, пляски и коррозии. Отказы, связанные с потерей несущей способности проводов носят износовый характер и увеличиваются примерно на 3-5 % в год.

Эти нарушения увеличились с 1955 года в 2,8 раза. Исключение составляют 70-80 годы, когда количество отказов несколько снизилось, из-за вводимых в эксплуатацию новых линий, на которые износовый фактор проводов не успел сказаться. Применение в расчетах повышенного среднеэксплуатационного тяжения в проводах (30% от разрывного усилия в проводе вместо 25% используемой в зарубежной практике), а также использование проводов и грозозащитных тросов с повышенной несущей способностью потребовало проектирование усиленной вибрационной защиты с применением гасителей вибрации нового поколения и протекторов, устанавливаемых на проводах в местах подвески. Такие мероприятия при проектировании ВЛ с повышенным тяжением не было выполнено, что привело к большим потерям при эксплуатации. Остановимся на наиболее характерных повреждениях и отказах проводов и грозозащитных тросов на линиях электропередачи России. Наиболее часто повреждаются провода на переходах ВЛ через водные преграды в местах установки в роликовых подвесах. Защита от вибрации на переходах выполняется в виде двух гасителей Стокбриджа и защитных муфт, устанавливаемых с зазорами между проводом и внутренней полостью 2-3 мм. Работа такой конструкции оказалась совершенно неэффективной и она спровоцировала интенсивный износ провода и самих муфт (рис.9).

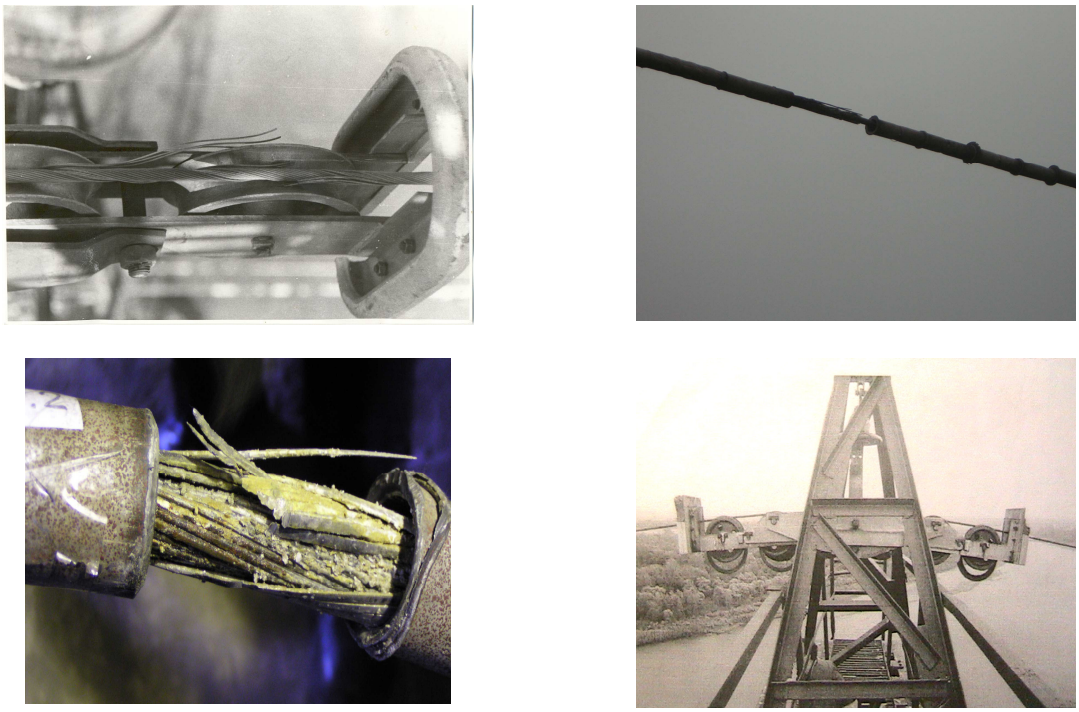


Рис.9 Характерные повреждения роликовых подвесов и грозозащитных тросов, проводов в роликовых подвесах

На 30-ти обследованных переходах ВЛ эти устройства приводили к разрушению провода и самих муфт после 8-10 лет эксплуатации, а в северных районах после 3-5 лет. В настоящее время разработан поддерживающий зажим – глухая лодочка, оборудованная ограничителем выхода провода из зажима при аварийных ситуациях за счет шпоночного устройства, работающего на срез. Данное устройство защищает опору от разрушения от нагрузок аварийного режима (рис.10).

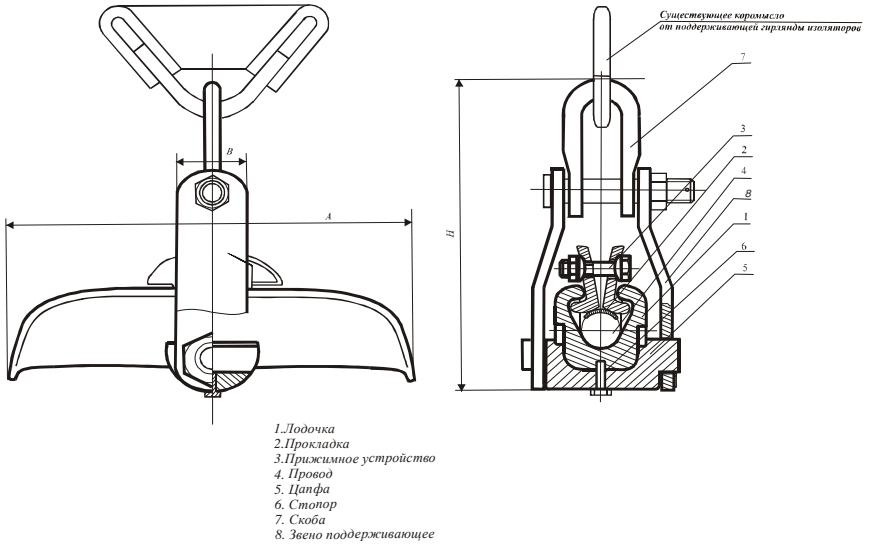


Рис.10 Поддерживающий зажим типа ПОН

Глухое крепление провода в лодочке прошло опытную проверку на нескольких переходах, где показало высокую эффективность.

Критическое положение с надежностью проводов сложилось в Северных районах России. Так например, за зимний период 1998-1999 г.г. в Северных сетях «Тюменьэнерго» имело место около 60 нарушений энергоснабжения из-за обрыва проводов ВЛ различных классов напряжения, причем подавляющее количество аварий было зафиксировано при понижениях температуры (ниже минус 40^0С) и, соответственно, при повышенных тяжениях. Осмотры показали, что абсолютно все разрушения произошли в местах, где провод был уже ослаблен усталостными разрушениями от вибрации, как в алюминиевых так и в стальных повивах. Все разрушения имели место вблизи поддерживающих зажимов, гасители вибрации, а иногда в точках выхода провода из соединительных зажимов. Именно в этих местах знакопеременные механические напряжения от вибрации имеют наибольшую величину.

Аналогичную картину имеем на проводах и тросах, эксплуатируемых в более благоприятных климатических условиях. Например, провода с повышенной несущей способностью (АЖС) и стальные троса, которые, как правило, смонтированы с повышенным тяжением (рис.11).

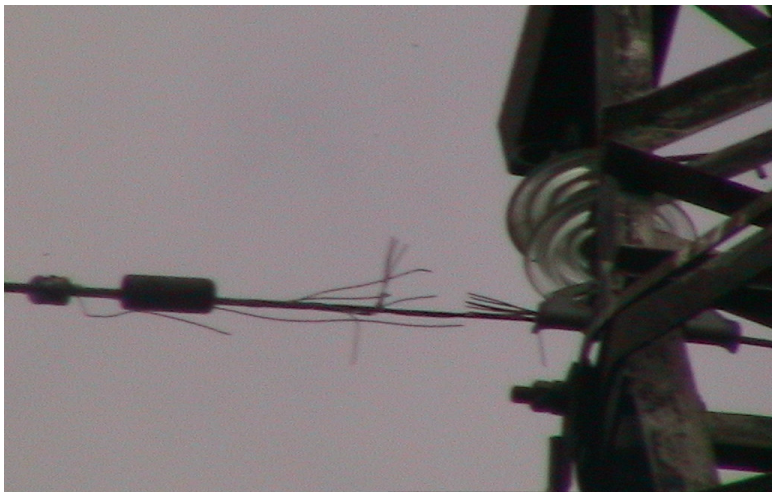


Рис.11 Разрушение провода АЖС

Так же отложение гололеда, изморози и мокрого снега на проводах представляет большую опасность для нормальной эксплуатации воздушных линий электропередачи, как со стороны статических нагрузок, так и динамических, в виде различных типов колебаний.

Гололедные нагрузки, в том числе и сверхрасчетные, обычно формируются при атмосферном процессе, действующем одновременно на территории 1-3-х энергосистем, вместо полосы шириной 1-2 км при ветровых нагрузках. Аварии при гололедно-ветровых нагрузках парализуют систему энергоснабжения потребителей на территории 1-3 административных областей, вследствие массовых обрывов проводов, разрушения арматуры, изоляции и поломок опор ВЛ. При гололедных отложениях, менее нормативных могут возникнуть колебания, в том числе, пляска при одностороннем отложении гололеда и низкочастотная вибрация при цилиндрической форме изморози (рис.12-13).

Борьба с обледенением проводов в течение многих лет оставалась важной задачей, которая решалась различными способами. Эти решения искали главным образом в повышении прочности элементов ВЛ, или полной ликвидации гололеда (плавка гололеда). При этом практически не использовались способы активной борьбы по уменьшению его количества.

Исследования массовых аварий и отказов от гололеда показали, что невозможным оптимально спроектировать линию, сведя к расчету и определению геометрических параметров ВЛ по прочности, без использования различных способов и устройств, позволяющих ограничивать величину гололедообразований. Защита ВЛ от пляски, вибрации и гололедообразования, а в необходимых случаях поступление информации о гололеде, превышающем допустимые значения, своевременно удалять его – вот основные аксиомы, обеспечивающие безопасную эксплуатацию линий.

Приведенные выше примеры показывают, что ошибки, совершенные на стадии проектирования привели к невосполнимым потерям в эксплуатации ВЛ. Необходимо в кратчайшие сроки разработать конструктивные решения подвесок проводов и тросов с использованием арматуры второго поколения с применением современной защиты от вибрации и пляски проводов

В этом направлении в России сделан технический прорыв, позволяющий успешно вести борьбу за надежность проводов и грозозащитных тросов.

ОРГРЭС разработаны унифицированные конструкции:

- для защиты одиночных проводов от всех видов колебаний и гололеда - ограничители типа ОГК (рис.14). Ограничители устанавливаются в пролете в пределах 100 метров между ними с неравными интервалами ±30 м.

- для защиты от пляски расщепленной фазы на два и более провода предлагаются гасители пляски типа ГПП (рис.15) *и ГПР* (рис.16). Их три типоразмера. Грузы гасителей имеют массу 2,4, 3,2 и 4,0 кг. Гасители типа ГПП устанавливаются на провод горизонтально в каждом подпролете между дистанционными распорками или же на плашки дополнительных горизонтальных дистанционных распорок. Гасители типа ГПР устанавливаются на плашки горизонтальных дистанционных распорок.

- *для защиты от вибрации - гасители вибрации типа ГВУ* (рис.17).

Рис.12 Гололед и его последствия на ВЛ

Рис.13 Разрушение элементов ВЛ от пляски проводов

Рис.14 Ограничитель гололедообразования и колебаний типа ОГК

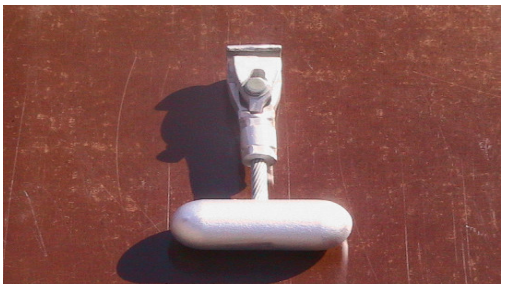


Рис.15 Гаситель пляски типа ГПП

Рис.16 Гаситель пляски типа ГПР

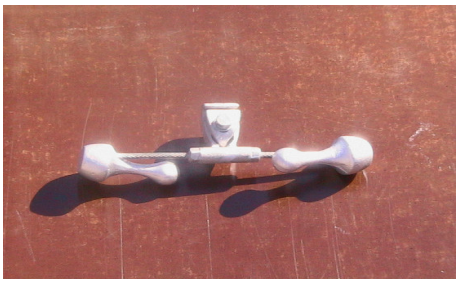


Рис.17 Гаситель вибрации типа ГРУ

Применяемые на линиях электропередачи провода и грозозащитные тросы имеют наружный диаметр от 8 до 47 мм, а диапазон опасных частот для них составляет от 4 до 150 Гц. Разработка гасителей, обеспечивающих эффективное демпфирование колебаний провода в столь широком диапазоне частот при минимальном количестве типоразмеров, представляет большие трудности. Опыт применения гасителей различных типов показывает, что гасители с эксцентричными грузами, с разными плечами гибких элементов и масс грузов, имеют более равномерное распределение рассеивания энергии по всему диапазону частот, что позволяет значительно снизить количество типоразмеров и на этой основе провести их унификацию. С учетом этого подхода и на основе расчетов многочисленных вариантов конструкций гасителей с последующими их испытаниями, Фирмой ОРГРЭС были разработаны и предлагаются для применения на линиях электропередачи пять типоразмеров гасителей вибрации с эксцентричными грузами *типа ГВУ* Основное преимущество таких многочастотных гасителей - их высокая эффективность, при сравнительно малой массе.

Одним из методов борьбы с пляской проводов является увеличение расстояния между ними или постановка межфазовых изолирующих распорок, которые предотвращают сближение (схлестывание) проводов, удерживая их на проектном расстоянии при пляске. Применение изолирующих межфазовых распорок можно рассматривать как смешанное решение по защите от пляски проводов, обладающее свойствами пассивных и активных средств защиты, так как межфазовые распорки одновременно повышают жесткость провода. При увеличении жесткости проводов снижаются гололедные нагрузки, что очень важно для обеспечения надежности ВЛ.

Появление полимерных изоляторов позволило довольно быстро расширить область их применения как средство борьбы с колебаниями при гололеде и ветре.

Для предотвращения схлестывания проводов в пролете при *вертикальном и горизонтальном расположении проводов* достаточно установить две распорки на расстоянии от края пролета (0,43-0,45)*L*.

Полимерные межфазовые распорки практически реализованы в изделиях вплоть до 500 кВ и их область применения расширяется по мере получения опыта их эксплуатации.

Для увеличения надежности работы проводов и грозозащитных тросов необходимо:

- использование конструктивных решений на основе арматуры второго поколения;
- обязательное применение защитных средств от вибрации, пляски, гололедообразования и износа.

4. Надежность арматуры ВЛ.

Нарушения работоспособности линейной арматуры за последние годы приведены в табл. 5.

Таблица 5

Причина отказа	1996 год		1997 год		1998 год		1999 год	
	Кол-во	%	Кол-во	%	Кол-во	%	Кол-во	%
Дефекты изготовления, ремонта, сборки и др.	27	50,0	21	43,8	42	58,3	35	47,9
Атмосферные явления	7	13,0	8	16,7	8	11,1	6	8,30
Знакопеременные нагрузки	18	33,3	19	39,5	22	30,6	22	30,1
Прочие посторонние воздействия	2	3,70	-	-	-	-	10	13,7
Всего:	54	100	48	100	72	100	73	100

Основной причиной нарушения работоспособности арматуры, как видно из табл.5, являются дефекты изготовления, монтажа, ремонта и составляют 50% от общего числа повреждений. Второе место по причинам повреждения линейной арматуры занимают знакопеременные нагрузки -33,4%. С первой причиной, приводящей к нарушению работоспособности линейной арматуры, необходимо бороться путем повышения контроля при ее изготовлении, монтаже и эксплуатации.

Повреждения линейной арматуры от действия знакопеременных нагрузок носят усталостный характер. Основными факторами, приводящими к усталостным повреждениям линейной арматуры, являются вибрация и пляска проводов и грозозащитных тросов.

На ВЛ с повышенной вибрацией происходит разрушение гасителей вибрации: прогибы тросиков, сбрасывание грузов, уход гасителей в пролет и т.д.

Пляска является одной из наиболее опасных разновидностей колебаний для арматуры.

Анализ случаев пляски проводов на ВЛ 35-750 кВ показывает, что до 90% случаев пляски приводит к нарушению режима работы ВЛ или к повреждению их элементов, причем только в 30% случаев нарушения ограничиваются кратковременными отключениями, а в остальных случаях перебои в работе линии длятся от нескольких часов до нескольких суток. В процессе пляски провода и линейная арматура испытывает действия значительных циклических (пульсирующих) поперечных и продольных нагрузок, величина которых достигает 1- 4 т. Следствием длительного воздействия таких нагрузок является разрушение подвесной и сцепной арматуры, повреждения дистанционных распорок, защитной арматуры, повреждения проводов и грозозащитных тросов. В первую очередь от циклических нагрузок разрушаются узлы, имеющие жесткую конструкцию и несущие большую нагрузку.

Для предупреждения данных нарушений в настоящее время разрабатываются предложения по методике испытаний линейной арматуры на воздействие вибрации и малоцикловых нагрузок, которые возникают при пляске проводов в соответствии с зарубежными нормами и, в частности, нормами СИГРЭ. Арматура, создаваемая в странах Западной Европы, США, Канады, по сравнению с отечественной, запроектированной для аналогичных расчетных условий, значительно менее металлоемка а по прочности и износоустойчивости имеет показатели значительно выше и следовательно более надежны (нормированная прочность зарубежной арматуры составляет 95% от разрывной прочности провода а отечественной 90% от прочности провода). Достаточная надежность при этом обеспечивается за счет технологических норм на всех стадиях строительного производства и эксплуатации.

5. Надежность изоляторов ВЛ.

Повреждаемость изоляции на ВЛ составляет 23-31% от общего количества нарушений. Основными причинами повреждения изоляции являются атмосферные перенапряжения, которые составляют около 60% от всех отказов, связанных с перенапряжением изоляции. Начиная с 1969 г. повреждаемость изоляции не меняется, что достигнуто за счет технического перевооружения при переходе на стеклянные изоляторы, а так же применения современной защиты от знакопеременных нагрузок. Однако уровень повреждения изоляторов высок и вызван отсутствием в гирлянде изоляторов защитной арматуры по распределению напряжений, отсутствием защиты по внутренним и грозовым перенапряжениями низким качеством изоляторов.

Остановимся более детально на характере работы гирлянды изоляторов. Гирлянда состоит из отдельных изоляторов, вокруг которых образуются емкости. Благодаря наличия емкостей ответвленного и тока проходящие через собственную емкость изолятора вызовут разное падение напряжения и будет там меньше, чем дальше от провода находится изолятор. Аналогичная картина наблюдается на изоляторах находящихся у заземленного конца изоляторов.

Падение напряжений будет меньше на тех изоляторах, которые будут дальше от заземленного конца гирлянды изоляторов. Емкость на землю имеет наибольшую величину, чем емкость по отношению к проводу и это оказывает влияние на характер распределения напряжения по изоляторам. Наибольшее напряжение ложится на изоляторы около провода, наименьшее на изоляторы в середине гирлянды и несколько повышенное напряжение у заземленного конца.

Распределение напряжений в гирляндах изоляторов при контроле измерительной штангой представлены в табл.6. (где N – количество изоляторов в гирлянде). Более благоприятные условия имеет место при расщеплении фаз на несколько проводов за счет увеличения емкости со стороны провода.

Таблица 6

ВЛ, кВ	N, шт	Напряжение, кВ на изолятор от конструкции опор																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
500	20	33	15	14	13	12	12	12	11	11	11	12	12	12	14	15	16	17	19	21	24
330	16	12			9	9	9	9	9	9	10	11	13	14	17	19	22				
220	13	10	8	8	8	7	7	7	8	8	10	12	14	20							
110	6	10	8	7	9	11	19														
35	3	6	5	9																	

Из табл.6 видно, что неравномерность распределения напряжений увеличивается с увеличением длины гирлянды, так при этом увеличивается суммарная емкость гирлянды по отношению к земле. Неравномерное распределение напряжений приводит к тому, что на ближайших к проводу изоляторах уже при рабочем напряжении может возникнуть корона, создающие радиопомехи и приводящая к интенсивной коррозии. Корона на изоляторах появляется при напряжении на нем порядка 20-25 кВ. На первый изолятор от провода приходится всегда около 20% полного напряжения. Это значит, что при напряжении 150 кВ и выше, возникают условия для появления короны. В таких условиях необходимо применять защитную арматуру: металлические кольца, восьмерки или овалы, укрепляемые на конце гирлянды со стороны провода. На рис.18 приведены кривые распределения напряжений без арматуры и с арматурой виде колец и восьмерок.

До недавнего времени на защитную арматуру, кроме выравнивания напряжений возлагалась защита изоляторов от разрушении при перекрытии гирлянды. Если гирлянда не снабжена арматурой, то канал разряда, то канал разряда плотнее прилегает к поверхности изоляторов, а возникающая дуга при длительном горении сильно разогревает изолятор в

месте касания. Установка в этом случае металлических рогов способствует тому, что бы дуга горела на безопасном расстоянии от гирлянды (рис.19). Однако применение быстродействующего отключения линий сократило время горения дуги до сотых долей секунды. Это позволило отказаться от применения такой арматуре на линиях 110 кВ и ниже при грозовых и внутренних перенапряжениях.

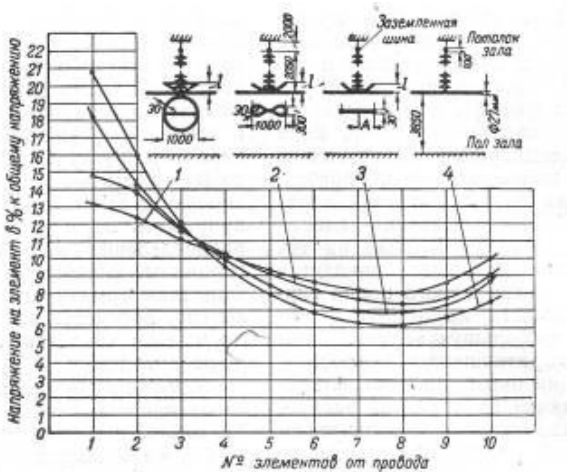


Рис.18 Кривые распределения напряжений

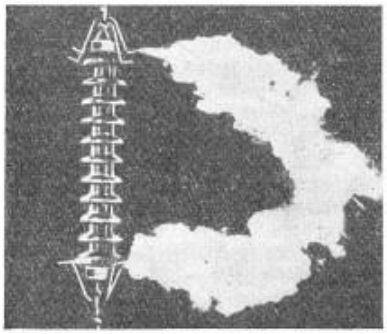


Рис.19 Горение дуги на гирлянде изоляторов

Однако в стержневых полимерных изоляторах характер изменения напряжений по длине изоляторов несколько иной и он представляется следующим образом - на первую шапку изолятора со стороны провода более 30% падения напряжения, а на последнею со стороны тела опоры около 0%. Такое распределение напряжения по изолятору хорошо иллюстрируется на рис.20, показывающий характер износа арматуры и изоляции на ВЛ 110 кВ. Поэтому для выравнивания напряжения и исключения коронного разряда необходимо предусматривать кольцевую защитную арматуру, утопленную за пределы первой шапки изоляторов.

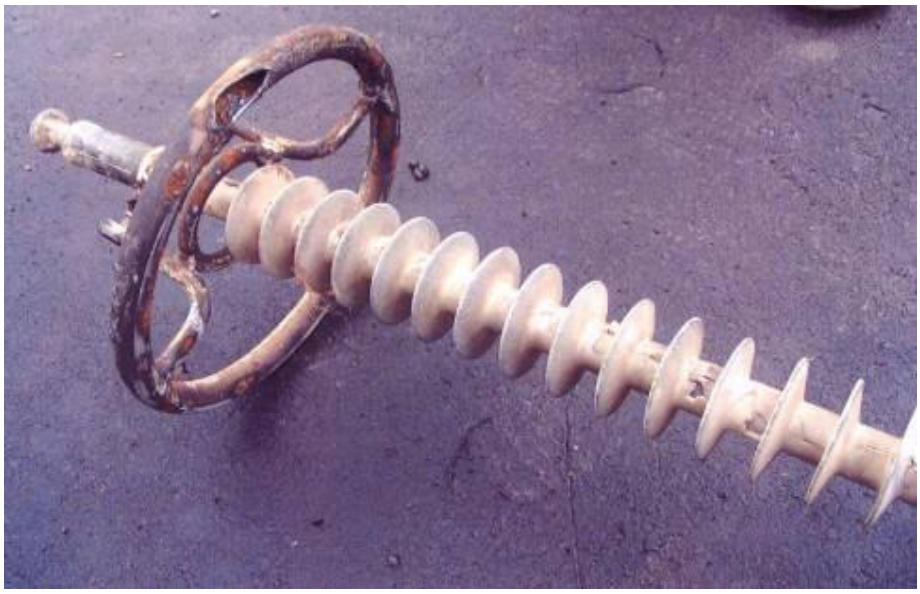


Рис.20 Разрушение защитного кольца полимерного изолятора

Рис.21 Перекрытие через гирлянду стеклянных изоляторов

В зарубежной практике с целью повышения надежности работы изоляции и избежание загрязнения окружающей среды разработана защитная арматура для ВЛ 35-400 кВ. В практических условиях России аналогичная защитная арматура используется на ВЛ 330-750 кВ. На рис. 22-24, 25-28, 29-32 и 33-35, соответственно показана арматура для ВЛ 35, 110, 220 и 400 кВ.

На указанных рисунках учтены особенности работы защитной арматуры в зависимости от номинального напряжения ВЛ и применяемого изоляционного материала. Имеющий опыт эксплуатации такой арматуры подтвердил их хорошие эксплуатационные качества в условиях центральной части Европы. Использование таких решений в условиях России несомненно повысит надежность работы изоляции в несколько раз.

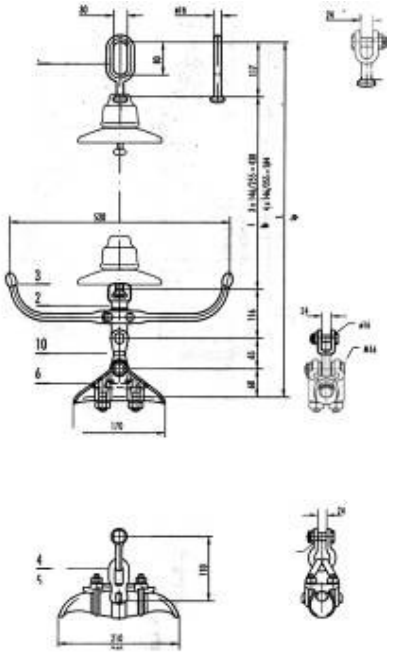


Рис.22

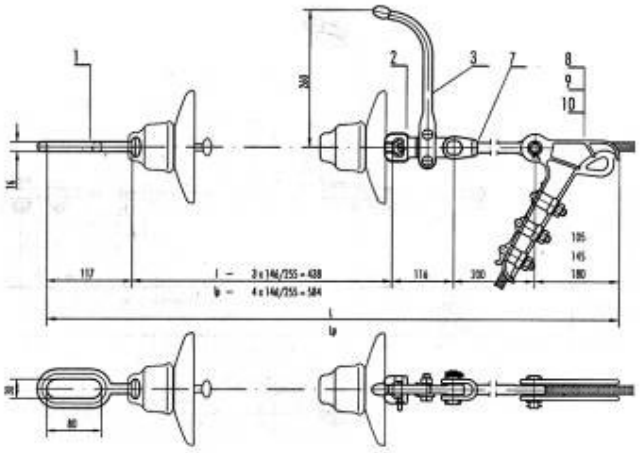


Рис.23

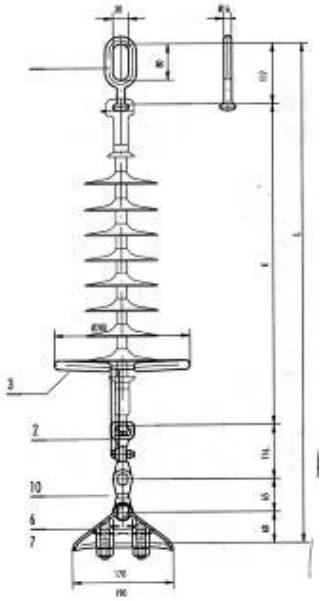


Рис.24

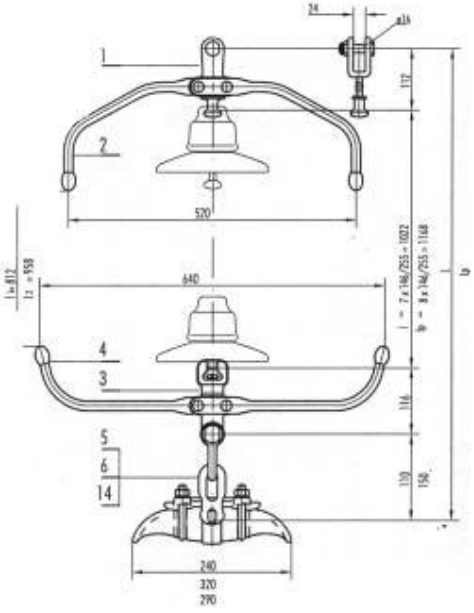


Рис.25

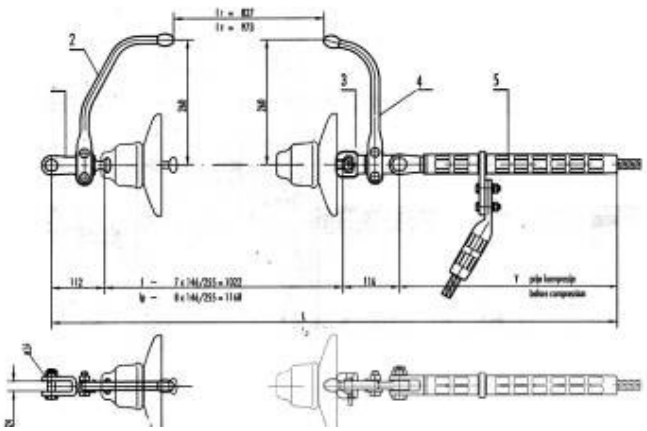


Рис.26

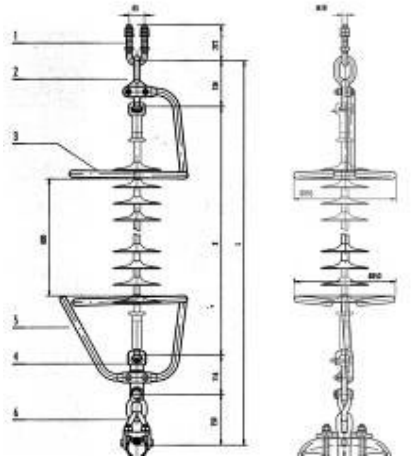


Рис.27

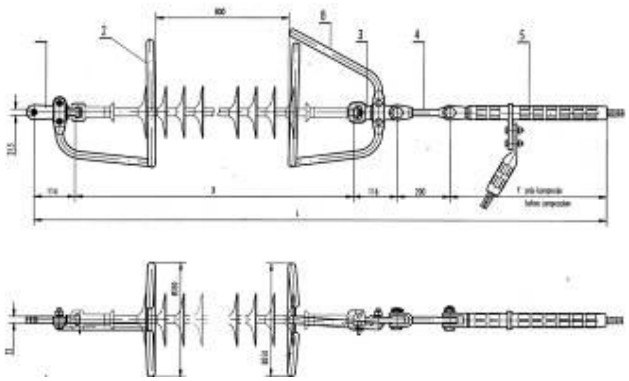


Рис.28

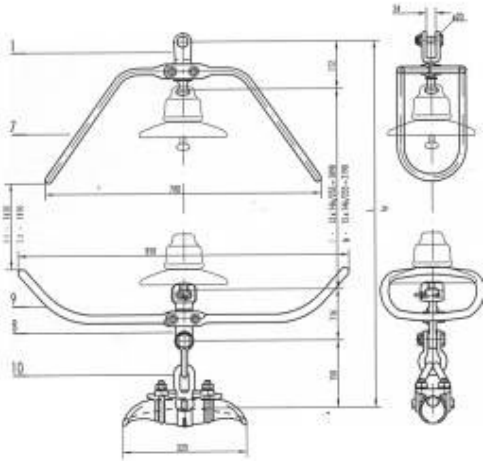


Рис.29

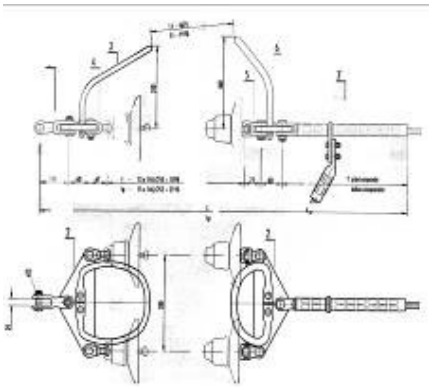


Рис.30

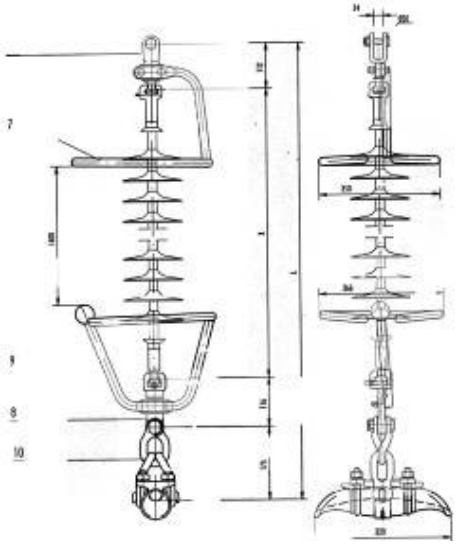


Рис.31

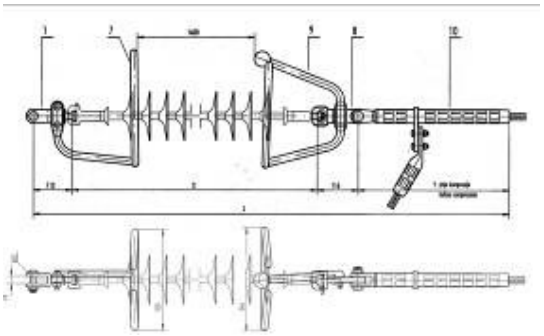


Рис.32

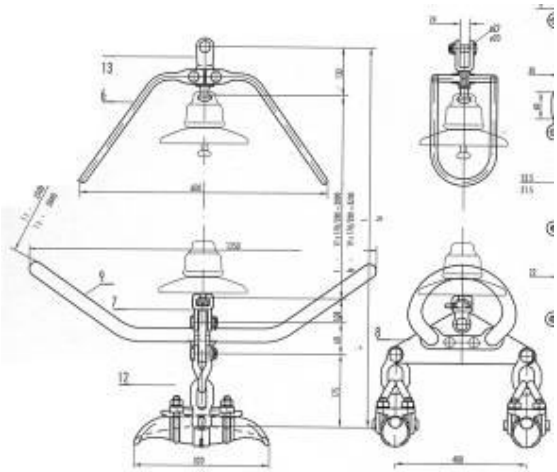


Рис.33

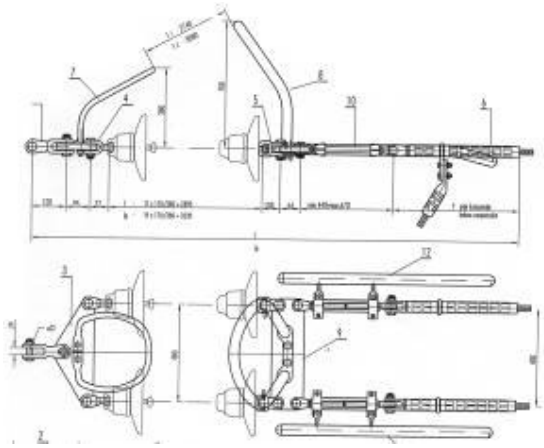


Рис.34

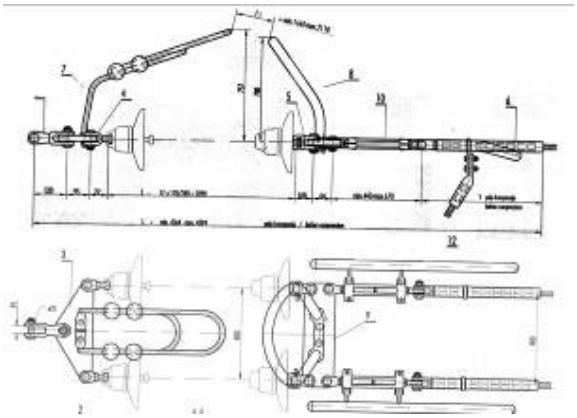


Рис.35

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Основной причиной, вызывающей резкое увеличение повреждаемости высоковольтных линий, является старение материала конструкции опор, проводов, арматуры и изоляторов. Линии электропередачи подвержены старению и износу от коррозии и знакопеременных нагрузок, при этом количество отказов увеличивается от 3-х до 5% в год.

2. По количеству отказов на первом месте стоят провода (52% с учетом грозовых перенапряжений и 37% без их учета), на втором месте изоляторы (соответственно 31% и 23%), на третьем месте опоры (13% и 9%), на четвертом - арматура (4% и 3%). Грозовые перенапряжения составляют 28%.

3. По тяжести отказов, приводящими к серьезным последствиям для линий электропередачи (большие затраты на восстановление и недоотпуск электроэнергии) на первом месте стоят опоры, затем провода, арматура, изоляция.

4. Для повышения эксплуатационной надежности ВЛ необходимо:

4.1. На стадии проектирования ВЛ:

-использовать прогрессивные технические решения и современные технологии и материалы, повышающие надежность и долговечность линий электропередачи;

- разработать новые конструкции опор на базе многогранных стоек, позволяющих сооружать новые линии с большим сроком эксплуатации, проводить техническое перевооружение и реконструкцию во всех климатических районах с необходимым уровнем надежности, быстро восстанавливать опоры после аварий, не позволяющих проведения актов вандализма;

- уделить основное внимание применению горячего цинкования при сооружении новых линий и комбинированных покрытий при реконструкции и ремонте;

- использовать буронабивные и забивные свайные основания, которые обеспечивают ненарушенную структуру грунта и позволяют создать жесткую заделку опор;

- использовать эффективные средства защиты от климатических воздействий (многочастотные гасители вибрации, гасители пляски и ограничители гололедообразования);

- использовать конструктивные решения на основе арматуры с улучшенными электромеханическими характеристиками и повышенной надежности (95% от разрывной прочности провода);

- применять в расчетах среднеэксплуатационное тяжение 25% от разрывного усилия для проводов с повышенной несущей способностью и эксплуатируемых на ВЛ, трассы которых проходят в районах Крайнего Севера.

4.2. На стадии монтажа ВЛ:

- обеспечить технический контроль за производством работ и не допускать необоснованного отклонения от проекта, приводящего к снижению надежности и долговечности ВЛ;

4.3. При эксплуатации ВЛ:

- повысить уровень диагностики, так как существующая система диагностики состояния ВЛ неэффективна, что связано как отсутствием на объектах электрических сетей технических средств в необходимом объеме, так и недостаточностью методической базы по всему спектру возможных систем диагностики;

- проводить инструментальное обследование элементов линий электропередачи ВЛ, эксплуатируемых более 30 лет с целью определения объемов реконструкции или ремонта;

- считать обязательным восстановление защитных покрытий при коррозионных потерях;

- проводить своевременно ремонт элементов ВЛ.

4.4. При ремонте и реконструкции ВЛ:

- при техническом перевооружении и реконструкции ВЛ довести техническое состояние их до требований ПУЭ 7-го издания и других нормативно-технических документов;

- применять современные технологии и материалы;

- учитывать изменения условий эксплуатации;

- использовать специальные механизмы и средства малой механизации, позволяющие повысить производительность труда и уровень техники безопасности.