Третья Российская
с международным участием
научно-практическая конференция
Новосибирск

2008 ЛЭП

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

НЕКОТОРЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗРАБОТОК НОВЫХ ТИПОВ ОПОР

Белозерцев В.Т.

Выполнено сравнение затрат строительства ВЛ 6 (10) кВ на железобетонных и металлических опорах. Показано, что для каждых конкретных условий существует определенное соотношение стоимости железобетонных опор к полной стоимости строительства ВЛ, при котором экономически целесообразно применение металлических опор даже по условию минимума первичных капитальных вложений. Приведена конструкция опор ВЛ 35 кВ и выше, которая сочетает преимущества опор из отдельных элементов (полная загрузка транспортных средств) и опор из сварных секций. Время монтажа разработанных опор соизмеримо со временем монтажа опор из сварных секций.

В энергетике России распределительные электрические сети напряжением 6-10 кВ являются наиболее протяженными. Их общая длина оценивается более чем в 2 млн. км. Подавляющая часть воздушных линий электропередач 6-10 кВ выполнена на железобетонных опорах.

В настоящее время по оценкам различных специалистов около 600 тыс. км воздушных линий 6-10 кВ находятся в крайне неудовлетворительном техническом состоянии. Объясняется это тем, что ремонт и реконструкция сетей в подобном объеме требует большого количества материальных и финансовых ресурсов. Удельное число отключений воздушных линий 6-10 кВ на 100 км составляет 6-7 раз в год, а для районов со сложными геолого-климатическими условиями, к которым относится большинство регионов Сибири и Севера – 20-30 раз в год. Повреждения опор в 40 % случаев является источником аварийности воздушных линий электропередач.

В последнее время в больших объемах ведется и новое строительство линий этого класса напряжения, в том числе и вдоль новых газо и нефтепроводов. Поэтому вопрос на каких опорах вести реконструкцию и строительство новых ВЛ – металлических или железобетонных , в настоящее время является актуальным.

Опоры для ВЛ 6-10 кВ.

Разработанные рядом организаций металлические опоры этого класса напряжения имеют более высокие механические характеристики и существенно превосходят железобетонные опоры по надежности и сроку службы. Широкое применение до сегодняшнего дня железобетонных опор вызвано их относительно низкой стоимостью. И априори считается, что применение стальных опор этого класса напряжения экономически оправдано лишь в районах с большими гололедно-ветровыми нагрузками, в районах со сложными грунтовыми условиями и в труднодоступных местностях. Однако данное устойчивое мнение не всегда оправдано.

Более высокая несущая способность металлических опор по сравнению с железобетонными опорами позволяет повысить высоту подвески проводов и увеличить максимальные напряжения в проводах. Данные факторы позволяют увеличить длины габаритных пролетов, что приводит к уменьшению количества опор, арматуры и изоляторов, стоимости транспортных расходов по доставке опор от завода-изготовителя до пикета, стоимости монтажа и сокращению сроков строительства. Однако это только первоначальные капитальные вложения. Увеличенные междуфазные расстояния на металлических опорах позволяют уменьшить вероятность схлестывания и пережигания проводов. Подвесная изоляция более надежна, чем штыревая, при которой достаточно часто происходит обрыв вязок. Более высокая надеж-

ность и срок службы металлических опор приводит к снижению и эксплуатационных расходов. Т.к. в этом случае снижается количество аварийного запаса опор и объем работ ремонтных бригад.

В 90-х годах ЗАО ВНПО "ЭЛСИ" были разработаны и начали применяться при строительстве ВЛ металлические опоры ВЛ 6 (10) кВ. В начале этого века металлические опоры этого класса напряжения по заданию ОАО "Газпром" разработало ЗАО ВНПО "РОСЛЭП". В последние два года Домодедовский завод металлоконструкций "МЕТАКО" и ОАО "Опытный завод "Гидромонтаж" начали активно продвигать на рынок многогранные металлические опоры, в том числе и опоры ВЛ 6 (10) кВ. В данном докладе не ставится цель сравнения этих опор. Принимая, в первом приближении, что опоры вышеперечисленных производителей примерно одинаковы по своим техническим характеристикам, сравнение выполним для железобетонных опор и металлических опор, разработанных ЗАО ВНПО "РОСЛЭП".

Конструкция металлических опор ВЛ 6 (10) кВ, разработанных ЗАО ВНПО "РОСЛЭП", определялась на основе следующих соображений. Нагрузки, которые испытывают опоры в процессе эксплуатации, имеют различные значения вдоль и поперек линии. Исходя из этого, стойки разработанных "РОСЛЭП" опор имеют форму разомкнутого шестигранника, выполненного из двух листовых гнутых профилей, имеющих по высоте переменное поперечное сечение, и соединенных между собой планками для промежуточных и раскосами для анкерно-угловых и концевых опор. Такое сечение имеет высокую эффективность использования металла (отношение момента сопротивления к площади сечения), что собственно и определяет вес опоры.

Высокая несущая способность анкерно-угловых и концевых опор позволила выполнить эти опоры свободностоящими, что может иметь решающее значение в стесненных условиях. Как известно, принцип построения различных типов железобетонных опор основан на присоединении к вертикально стоящей опоре одного или нескольких подкосов.

В настоящее время "РОСЛЭП" разработано около 200 типов различных типов опор для ВЛ 6 (10) кВ. Разработанные опоры предназначены для подвески проводов типа АС, СИП-3 (SAX), "Торсада". В состав номенклатуры выпускаемых опор входят различные типы промежуточных, анкерно-угловых, ответвительных, переходных, опоры для установки электрооборудования, одноцепные и двухцепные, опоры совместной подвески. На промежуточных опорах может быть применена как подвесная, так и штыревая изоляция. В качестве основного типа фундаментов используются трубы Ǿ219 мм для промежуточных опор и Ǿ426 мм для анкерно-угловых. Для слабых грунтов разработана подставка, которая устанавливается на четыре сваи или трубы.

Указания по применению этих опор приведены в разработанном "РОСЛЭП" альбоме РЛ/99-373. На строительство ВЛ 6 (10) кВ разработаны технологические карты, в том числе и технологическая карта на монтаж СИП-3. На конструкцию опор получен патент на полезную модель.

Большинство ВЛ 6 (10) кВ выполнено с применением вибрированных стоек СВ105. Сравнение проведем для металлических опор из гнутого профиля ПС10-11Р и АУС10-2Р (альбом РЛ/99-373), разработанных ЗАО ВНПО "РОСЛЭП" с железобетонными опорами П10-1, П10-2 и УА10-1, выполненными на базе стойки СВ105. Выбор габаритных пролетов для железобетонных опор определялся на основе расчетов провода с учетом изменений ПУЭ седьмого издания и указаний альбома серии 3.407.1-143.

Технические характеристики промежуточных опор приведены в табл.1. Заглубление опор в грунте принято равным 2,5 м. Величины допустимых напряжений в проводах приведены в табл.2 (допустимые напряжения в проводах при среднегодовой температуре для всех типов опор и проводов – 40 МПа). Технические характеристики анкерно-угловых опор в табл.3.

Благодаря более высокой несущей способности металлических опор у них, как это следует из приведенных выше таблиц, существенно выше высота подвеса нижнего провода и

выше допустимые напряжения в проводах при наибольшей нагрузке. А это и определяет величины габаритных пролетов опор, которые для промежуточных опор приведены в табл.4, для анкерно-угловых в табл.5. Из табл.1 видно, что высота промежуточной опоры вместе с фундаментом составляет 14,5 м, а железобетонной стойки СВ105 - 10,5 м.

Таблица 1

Технические характеристики промежуточных опор

Тип опор	Опора "РОСЛЭП" **ПС10-11Р**	Железобетонные опоры **П10-1, П10-2**
Район по ветру (допустимое ветровое давление, Па)	I-V (1000)	I-IV (800)
Район по гололеду (допустимая стенка гололеда, мм)	I-IV (10-25)	I-III (10-20)
Максимально допустимый тип провода	АС120/19	АС95/16
Междуфазное расстояние, м	2	1,4
Тип изоляции	Подвесная, штыревая	штыревая
Высота опоры с фундаментом, м	14,5	10,5
Высота подвеса нижнего провода, м	9,4	7,75
Допустимый изгибающий момент, кНм	80	35
Масса опоры, кг	274	1180
Масса фундамента, кг (заглубление 2,5 м, труба Ø219х8)	190	-
Масса опоры с фундаментом, кг	464	1180

Таблица 2

Максимально допустимые величины напряжений в проводах

Марка и сечение провода		АС 95/16	АС 70/11	АС 50/8
Максимальные напряжения в проводах при наибольшей нагрузке или низшей температуре, МПа	Опоры "РОСЛЭП"	81	114	116
	Железобетонные опоры	64	90	116

Таблица 3

Технические характеристики анкерно-угловых опор

Тип опор	Опора "РОСЛЭП" **АУС10-2Р**	Железобетонная опора **УА10-1**
Район по ветру (допустимое ветровое давление, Па)	I-V (1000)	I-IV (800)
Район по гололеду (допустимая стенка гололеда, мм)	I-IV (10-25)	I-III (10-20)
Максимально допустимый тип провода	АС120/19	АС95/16
Высота подвеса нижнего провода, м	8,5	7,1
Междуфазное расстояние, м	1,5	0,75
Допустимый изгибающий момент, кНм	429	-
Масса опоры, кг	464	2580
Масса фундамента, кг (заглубление 3,5 м, труба Ø426х10)	564	-
Масса опоры с фундаментом, кг	1028	2580

Стоимость строительства ВЛ складывается из стоимости опор, провода, изоляции, арматуры, доставки вышеперечисленного на пикет и стоимости монтажа.

Очевидно, что стоимость металлических опор всегда дороже стоимости железобетонных опор.

Таблица 4

Величины габаритных пролетов, количество промежуточных опор
и их вес с фундаментами на 1 км ВЛ
(местность населенная, заглубление фундамента 2,5 м)

Марка и сечение провода	Тип опор		Толщина стенки гололеда, мм			
			10	15	20	25
АС 95/16	опора "РОСЛЭП" ПС10-11Р	Величина габаритного пролета, м	90	75	65	55
		Количество опор на 1 км ВЛ, шт	11,1	13,3	15,4	18,2
		Вес опор с фунд-ми на 1 км ВЛ, т	5,2	6,2	7,2	8,4
	ж/б опора П10-1, П10-2	Величина габаритного пролета, м	45	45	40	30
		Количество опор на 1 км ВЛ, шт	22,2	22,2	25	33,3
		Вес опор на 1 км ВЛ, т	26,2	26,2	29,5	39,3
АС 70/11	опора "РОСЛЭП" ПС10-11Р	Величина габаритного пролета, м	90	80	70	60
		Количество опор на 1 км ВЛ, шт	11,1	12,5	14,3	16,7
		Вес опор с фунд-ми на 1 км ВЛ, т	5,2	5,8	6,6	7,7
	ж/б опора П10-1, П10-2	Величина габаритного пролета, м	45	45	40	35
		Количество опор на 1 км ВЛ, шт	22,2	22,2	25	28,6
		Вес опор на 1 км ВЛ, т	26,2	26,2	29,5	33,7
АС 50/8	опора "РОСЛЭП" ПС10-11Р	Величина габаритного пролета, м	85	70	60	50
		Количество опор на 1 км ВЛ, шт	11,8	14,3	16,7	20
		Вес опор с фунд-ми на 1 км ВЛ, т	5,5	6,6	7,7	9,3
	ж/б опора П10-1, П10-2	Величина габаритного пролета, м	45	40	40	35
		Количество опор на 1 км ВЛ, шт	22,2	25	25	28,6
		Вес опор на 1 км ВЛ, т	26,2	29,5	29,5	33,7

Таблица 5

Величины габаритных пролетов для анкерно-угловых опор

Тип опор		Толщина стенки гололеда			
		10	15	20	25
Опора "РОСЛЭП" АУС10-2Р	Величина габаритного пролета, м	70	65	55	50
Железобетонная опора УА10-1	Величина габаритного пролета, м	45	45	45	-

Стоимость железобетонной стойки СВ105 у различных поставщиков в настоящее время колеблется от 7 до 10 тыс. руб. за 1 шт. Дополнительно ~ 1 тыс. руб. стоимость металлоконструкций. Примем стоимость 1 железобетонной стойки с металлоконструкциями равной 10 тыс. руб.

Стоимость одной металлической промежуточной опоры ПС10-11Р вместе с фундаментом оценим в 40 тыс. руб.

Количество промежуточных опор на 1 км ВЛ в 1,5-2,0 раза меньше железобетонных (табл. 4). Примем не самый лучший вариант для металлических опор, когда это соотношение равно 1,6. Исходя из этого стоимость металлических опор на 1 км ВЛ выше стоимости железобетонных опор в 2, 5 раза.

$$O_{мо} = \frac{O^{I}_{мо}}{O^{I}_{жб} \cdot 1{,}6} = \frac{40000}{10000 \cdot 1{,}6} = 2{,}5 \cdot O_{жб},$$

где, $O_{мо}$ - стоимость металлических опор на 1 км ВЛ;

$O_{жб}$ - стоимость железобетонных опор на 1 км ВЛ;

$O^{I}_{мо}$ - стоимость 1 металлической опоры;

$O^{I}_{жб}$ - стоимость 1 железобетонной опоры.

Стоимость изоляции и арматуры 1 км ВЛ на металлических опорах меньше в 1,6 раза стоимости изоляции и арматуры на железобетонных опорах.

$$И_{мо} = \frac{И_{жб}}{1{,}6},$$

где $И_{мо}$ - стоимость изоляции и арматуры 1 км ВЛ на металлических опорах;

$И_{жб}$ - стоимость изоляции и арматуры 1 км ВЛ на железобетонных опорах.

Вес металлических опор на 1 км в 4,5 раза меньше веса железобетонных (табл. 4), таким образом, и транспортные расходы металлических опор во столько же раз меньше транспортных расходов железобетонных опор. Уменьшение транспортных расходов на доставку изоляции и арматуры учитывать не будем.

$$T_{мо} = \frac{T_{жб}}{4{,}5},$$

где $T_{мо}$ - стоимость транспортных расходов по доставке металлических опор от завода-изготовителя на пикет на 1 км ВЛ;

$T_{жб}$ - стоимость транспортных расходов по доставке железобетонных опор от завода-изготовителя на пикет на 1 км ВЛ.

Стоимость монтажа 1 км ВЛ на металлических опорах (земляные работы, установка опор, крепление арматуры и провода) примем равной в 1, 5 раза меньше стоимости монтажа на железобетонных опорах, исходя из того, что количество металлических опор в 1, 6 раза меньше чем железобетонных.

$$M_{мо} = \frac{M_{жб}}{1{,}5},$$

где $M_{мо}$ - стоимость монтажа 1 км ВЛ на металлических опорах;

$M_{жб}$ - стоимость монтажа 1 км ВЛ на железобетонных опорах.

Стоимость строительства 1 км ВЛ на железобетонных опорах равна:

$$C_{жб} = O_{жб} + П + И_{жб} + T_{жб} + M_{жб},$$

где, $П$ - стоимость провода на 1 км ВЛ, которая для ВЛ на металлических и железобетонных опорах одинакова.

Стоимость строительства 1 км ВЛ на металлических опорах, исходя из вышеизложенного, будет равна:

$$C_{мо} = 2{,}5 \cdot O_{жб} + П + \frac{И_{жб}}{1{,}6} + \frac{T_{жб}}{4{,}5} + \frac{M_{жб}}{1{,}5}$$

Стоимость строительства 1 км ВЛ на железобетонных опорах будет равна или больше стоимости строительства 1 км ВЛ на металлических опорах при условии:

$$C_{жб} - C_{мо} = O_{жб} + П + И_{жб} + T_{жб} + M_{жб} - 2{,}5 \cdot O_{жб} - П - \frac{И_{жб}}{1{,}6} - \frac{T_{жб}}{4{,}5} - \frac{M_{жб}}{1{,}5} \geq 0.$$

Откуда,

$$1{,}25 \cdot O_{жб} \leq 0{,}375 \cdot И_{жб} + 0{,}777 \cdot T_{жб} + 0{,}333 \cdot M_{жб} \quad (1)$$

Примем стоимость изоляции и арматуры на 1 км ВЛ равной 3% от стоимости строительства ВЛ ($И_{жб} = 0{,}03 \cdot C_{жб}$), стоимость транспортных расходов – 6% от стоимости строительства ВЛ ($Т_{жб} = 0{,}06 \cdot C_{жб}$), стоимость монтажа 1 км ВЛ – 50% от стоимости строительства ВЛ ($М_{жб} = 0{,}5 \cdot C_{жб}$). Подставляя эти значения в неравенство (1) получим условие, при котором стоимость строительства ВЛ на металлических опорах равна стоимости строительства ВЛ на железобетонных опорах:

$$О_{жб} \le 0{,}18 \cdot C_{жб} \qquad (2)$$

Принимая стоимость 1 железобетонной опоры равной 10 тыс. руб. и количество их на 1 км ВЛ равным 22,2 (табл. 4) получим стоимость железобетонных опор на 1 км - $О_{жб} = 10 \cdot 22{,}2 = 222$ тыс. руб. Подставляя это значение в неравенство (2) получим значение стоимости строительства 1 км ВЛ:

$$C_{жб} \ge \frac{О_{жб}}{0{,}18} = \frac{222}{0{,}18} \ge 1230 \text{ тыс. руб.}$$

Т.е. при условии, когда стоимость строительства 1 км ВЛ на железобетонных опорах больше 1 млн. 230 тыс. руб., экономически целесообразно применение металлических опор даже по условию минимума первичных капитальных вложений. При этом увеличивается надежность линии и уменьшаются затраты на эксплуатацию. И чем дороже стоимость монтажа и транспортных расходов, тем экономически выгоднее применение металлических опор.

Естественно, неравенство (2) не может быть аксиомой. Для разных условий коэффициент в неравенстве (2) может принимать различные значения. Важно, что применение металлических опор может быть экономически оправдано и в районах с нормальными районно-климатическими условиями и нельзя считать априори, что стоимость строительства ВЛ на железобетонных опорах всегда меньше стоимости строительства ВЛ на металлических опорах. Каждый конкретный случай требует проработки обоих вариантов.

Следует отметить, что в расчетах принимался не лучший вариант для металлических опор по соотношению их количества на 1 км ВЛ к железобетонным.

Регион строительства ВЛ принимался с нормальными грунтами. В районах со слабыми грунтами и в болотистой местности, где необходимо более глубокое заземление опор, разница между стоимостью железобетонных и металлических опор будет уменьшена.

Не учитывалось увеличение стоимости доставки изоляции и арматуры для ВЛ на железобетонных опорах по сравнению с металлическими опорами.

Не учитывалось, что во время транспортировки железобетонных опор возможно появление трещин и отбраковка опор на пикете приведет к еще большему количеству железобетонных опор на 1 км ВЛ.

Не учитывалось уменьшение сроков строительства ВЛ на металлических опорах по сравнению с железобетонными, что также приводит к определенной экономии первоначальных капиталовложений.

Опоры для ВЛ 35 кВ.

Основная масса опор 35 кВ и выше, эксплуатируемых в настоящее время, это стальные свободностоящие опоры башенного типа, монтаж которых выполняется из отдельных элементов. Достоинством таких опор является простая технология изготовления и их хорошая транспортабельность, позволяющая использовать полную грузоподъемность транспорта. Недостатком опор такого типа являются значительные трудозатраты при их монтаже.

Узкобазые фланцевые опоры с поясами из гнутого профиля, которые монтируются из сваренных в заводских условиях секций, и многогранные опоры с телескопическим соединением секций имеют небольшие трудозатраты по сборке опор на пикете, но увеличенные транспортные расходы.

"РОСЛЭП" по заданию ОАО "Газпром" была разработана конструкция опор, которая имеет трудозатраты по сборке соизмеримые с трудозатратами по сборке опор из сваренных в

заводских условиях секций и хорошую транспортабельность, при которой возможно использовать полную грузоподъемность транспорта.

В настоящее время разработаны и успешно прошли механические испытания четыре типа промежуточных опор 35 кВ (одноцепная и двухцепная, с грозотросом и без грозотроса), разработаны и готовятся к механическим испытаниям два типа анкерно-угловых опор 35 кВ.

Разработанные опоры имеют пространственную решетчатую конструкцию секций башенного типа, которые собирается из отдельных, сваренных в заводских условиях четырех плоских ферм, образующих грани пространственной решетчатой конструкции. Данное обстоятельство позволяет существенно снизить количество сборочных единиц, по сравнению с опорами, собираемыми из отдельных элементов, и снизить время их монтажа. Компактность упаковки плоских сварных ферм позволяет использовать полную грузоподъемность транспортных средств. Таким образом, предлагаемая конструкция опоры сочетает достоинства опор из отдельных элементов (полная загрузка транспортных средств) и опор из сварных секций. Время монтажа разработанных опор соизмеримо со временем монтажа опор из сварных секций.

Пояс каждой плоской фермы по отношению к своим раскосам и распоркам расположен таким образом, что составной пояс секции пространственной решетчатой конструкции, состоящий из двух поясов смежных плоских ферм, имеет в собранном виде сечение прямоугольной трубы (рис.1). Такое сечение, обладая высокими геометрическими характеристиками (момент инерции, радиус инерции, площадь сечения), имеет минимальную площадь для ветрового напора.

а) б)

Рис.1. Промежуточная опора 35 кВ панельного типа:
а) общий вид промежуточной опоры 35 кВ, установленной в концевом режиме на переходе ВЛ 6 кВ через дорогу, провод СИП-3; б) конструкция составного пояса опоры

База одноцепных промежуточных опор 1,8 м, двухцепных промежуточных опор – 2,1 м. База анкерных опор 4,2 м. В качестве фундаментов могут быть использованы сваи или подножники.

Все разработанные опоры рассчитаны на применение в V районе по ветру, V районе по гололеду и подвеску сталеалюминевых проводов сечением 95 - 185 мм^2. Напряжения в проводах выбраны максимально допустимыми для данных типов проводов.

Для проектных организаций разработан альбом с указаниями по применению этих опор, для монтажных организаций технологические карты. На конструкцию опор получено положительно решение о выдаче патента на изобретение.

На базе промежуточных опор "РОСЛЭП" разработаны прожекторные мачты высотой 19 и 24 м и альбом по их применению.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ сравнения затрат при строительстве ВЛ 6 (10) кВ на железобетонных и металлических опорах показывает, что для каждых конкретных условий существует определенное соотношение стоимости железобетонных опор к полной стоимости строительства ВЛ, при котором экономически целесообразно применение металлических опор даже по условию минимума первичных капитальных вложений. При этом увеличивается надежность линии и уменьшаются затраты на эксплуатацию. И чем дороже стоимость монтажа и транспортных расходов, тем экономически выгоднее применение металлических опор.

2. Разработанная ЗАО ВНПО "РОСЛЭП" конструкция опор ВЛ 35 кВ и выше сочетает преимущества опор из отдельных элементов (полная загрузка транспортных средств) и опор из сварных секций. Время монтажа разработанных опор соизмеримо со временем монтажа опор из сварных секций. Опоры рассчитаны на применение в жестких условиях – V район по ветру, V район по гололеду. На базе этих опор разработаны прожекторные мачты высотой 19 и 24 м.