Квадратный профиль — новые решения в проектировании решетчатых опор ВЛ

УДК 621.315.668.2

Статья развивает поднятую в предыдущих номерах тему использования сталей повышенной прочности для опор ВЛ. Впервые выполненная в нашей стране эскизная разработка конструкций из квадратных труб показала, что повышенная жесткость таких сечений при работе на сжатие позволяет существенно облегчить опоры ВЛ, традиционно изготавливаемые из уголкового проката. Установка таких опор на трассах ВЛ 110–500 кВ позволит сократить стоимость строительства линий в 1,2–1,5 раза. Использование атмосферостойких сталей приведет к дополнительному снижению затрат на этапе строительства и эксплуатации.

Качановская Л.И.,
к.т.н., заведующая НИЛКЭС ООО «ПО «Энергожелезобетонинвест»

Касаткин С.П.,
начальник сектора НИЛКЭС ООО «ПО «Энергожелезобетонинвест»

Ключевые слова:
решетчатые опоры ВЛ, стали повышенной прочности, атмосферостойкая сталь, квадратный профиль, шпренгельные системы

Металлургическая промышленность страны наладила выпуск сталей повышенной прочности, в том числе и атмосферостойких. Стали доступными для широкого использования не только прокатный профиль уголкового сечения, но и листовой прокат, а также стальные трубы гнутосварного профиля (ГСП) квадратного и прямоугольного сечения [1].

Типовые конструкции опор ВЛ, массово применяемые на линиях электропередачи, спроектированы с учетом использования уголкового прокатного профиля из стали С245. Использование фасона квадратного профиля для опор ВЛ может дать максимальный эффект за счет использования именно механических характеристик таких сечений, которые существенно отличаются от уголкового профиля большей изгибной жесткостью.

Для того чтобы конструкции опор, изготовленные из квадратного профиля, стали экономически выгодными (стоимость опор на каждый километр ВЛ уменьшилась по сравнению со стоимостью существующих решетчатых конструкций), необходимо разработать новые геометрические схемы опор. Новые характеристики профилей (новая форма и повышенная прочность) требуют поиска новых конструктивных решений как для промежуточных, так и для анкерных опор.

Кроме того, использование квадратных профилей из атмосферостойкой стали позволит сделать решетчатую опору линии электропередачи необслуживаемой (не нужно красить и цинковать) на протяжении всего срока ее службы.

В сравнении со стоимостью конструкционных сталей массового применения высокопрочная сталь марки 14ХГНДЦ в настоящее время дороже ориентировочно на 15%. Однако с учетом отсутствия затрат на эксплуатационное обслуживание опор ВЛ (для атмосферостойкой стали) возможно достичь существенного снижения затрат на жизненном цикле ВЛ, так как оцинковка металлоконструкций увеличивает стоимость изделий на 25–30%.

Разработка новых типов опор может дать комплексный эффект (сокращение затрат на ВЛ в целом) в случае учета характеристик проводов, выпускаемых отечественной промышленностью.

ВЫБОР ПРОВОДОВ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ОПОР

Новые типы проводов (высокопрочные, высокотемпературные) требуют разработки для них оптимальных схем опор. Например, возможность удлинения пролетов при использовании высокопрочных проводов потребует увеличения прочности элементов как промежуточных, так и анкерно-угловых опор ВЛ.

Департаментом технологического развития и инноваций ПАО «Россети» поставлена задача рассмотрения вариантов конструкций из квадрат-

ного профиля с подвеской обычных и инновационных проводов для технико-экономического обоснования их применения в сравнении с широко используемыми в настоящее время типовыми решетчатыми опорами из прокатных уголков.

Для эскизной разработки опор ВЛ 110 кВ выбраны 5 типов проводов, обладающих сопоставимой пропускной способностью, выраженной длительно допустимым током, рассчитанным по единой методике в соответствии с СТО ПАО «ФСК ЕЭС» [2].

Провода разделены на две группы в зависимости от их прочностных характеристик: обычные (АС 240/32; АСку 240/32; АСТ 185/29) и высокопрочные (АСВП 258/74; АСВТ 190/55).

Физико-механические характеристики проводов приведены в таблице 1.

Табл. 1. Физико-механические характеристики проводов

Расчетные параметры	АС 240/32 ГОСТ 839-80	АСку 240/32	АСТ 185/29	АСВП 258/74 II	АСВТ 190/55 II
Группа проводов	I (обычные)			II (высокопрочные)	
Сечение алюминий/сталь, мм²	240/31,7	240/32	181/29	332/74,3	190,4/55
Диаметр, мм	21,6	19,4	18,8	21,6	18,5
Электрическое сопротивление 1 км провода постоянному току при 20°С, Ом, не более	0,1182	0,1170	0,1639	0,1116	0,1541
Разрывное усилие, Н	75 050	87 680	66 570	154 000	114 900
Масса 1 км провода, кг	921	899	728	1337	990
Допускаемое максимальное напряжение, кг/мм²	12,2	14,7	14,5	21,2	21,4
Допускаемое напряжение в среднеэксплуатационном режиме, кг/мм²	8,1	9,8	9,67	14,13	14,27
Длительно допустимый ток, А при температуре провода, °С	697 70	640 70	744 100	675 70	718 100

КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ ОПОР И ФУНДАМЕНТОВ ДЛЯ ВЛ 110 КВ

Для каждой группы проводов разработаны промежуточные и анкерные двухцепные опоры. Для обычных проводов — П110-2С и У110-2С; для высокопрочных — П110-4С и У110-4С. Схемы опор приведены на рисунках 1 и 2.

Проектирование двухцепных опор проведено, исходя из нагрузок от проводов и тросов в различных режимах и от ветра на конструкцию опоры. Расче-

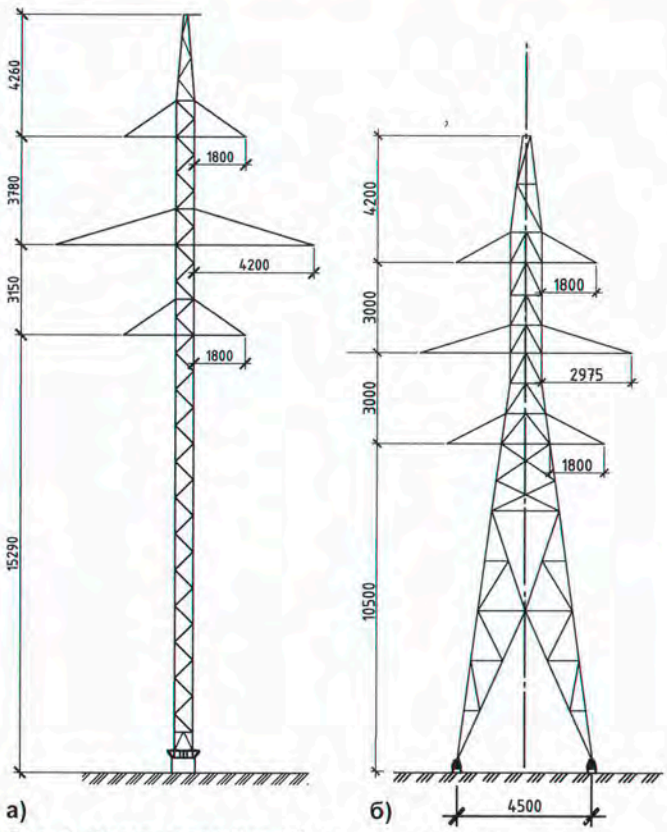

Рис. 1. Схемы опор для обычных проводов: а) П110-2С; б) У110-2С

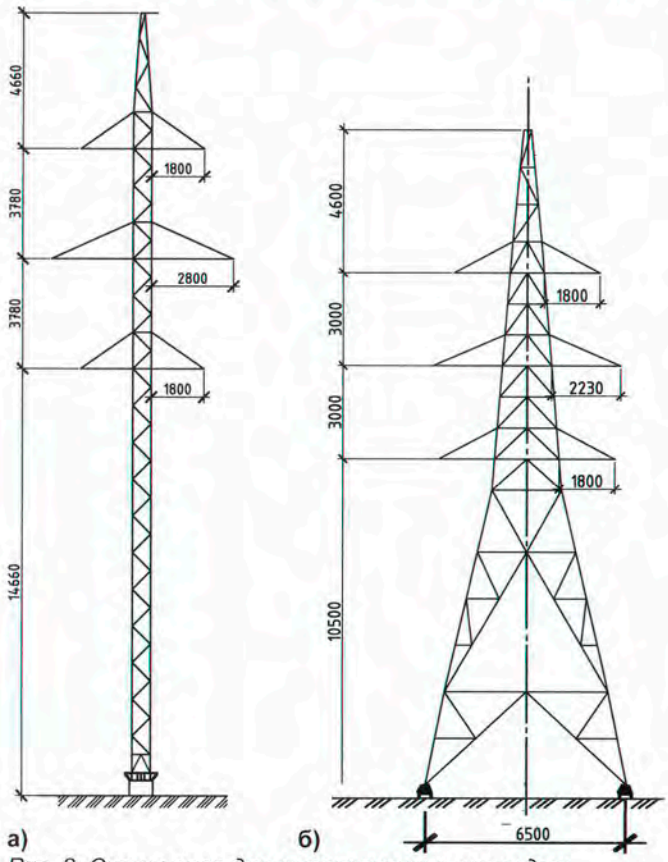

Рис. 2. Схемы опор для высокопрочных проводов: а) П110-4С; б) У110-4С

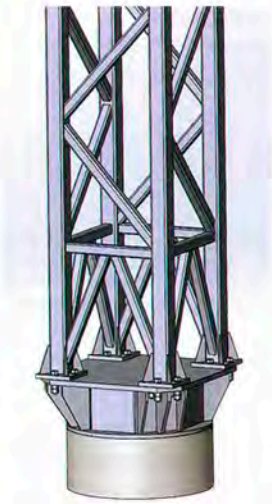

Рис. 3. Схема закрепления опоры ВЛ на фундаменте

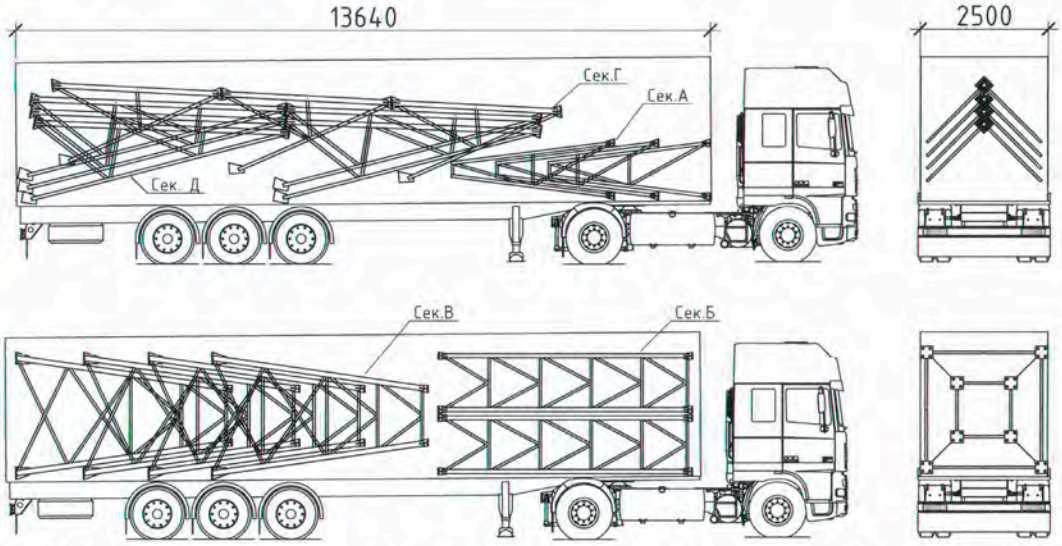

Рис. 4. Принципиальная схема компактной погрузки секций опор У110-2С в бортовой грузовой автомобиль

ты выполнены при помощи «Интегрированной системы анализа конструкций SCAD Office». Выбор поперечных сечений элементов произведен из условия использования стали класса прочности 345 (в том числе атмосферостойкой стали марки 14ХГНДЦ) для 2 района по ветру (W = 500 Па) и 3 района по гололеду (b = 20 мм) [3].

Опоры планируется собирать на стройплощадке из укрупненных сварных секций.

Промежуточные опоры разработаны узкобазыми с параллельными поясами. Все четыре «ноги» конструкции устанавливаются на один фундамент и крепятся к нему при помощи фланцевого соединения. Для закрепления опор могут быть использованы железобетонные центрифугированные сваи-оболочки диаметром 0,8 м, которые имеют стальной оголовок для соединения с опорой. Длина фундаментных секций в стандартном изготовлении составляет 4, 5 или 6,7 м. Схема закрепления промежуточной опоры на фундаменте приведена на рисунке 3.

Фундаменты указанного типа отличаются от стальных свай-оболочек высокой коррозионной устойчивостью и вдвое более низкой стоимостью.

Анкерные опоры, воспринимающие значительные нагрузки от тяжения проводов и тросов, разработаны с использованием шпренгельной системы, позволяющей, рационально подобрав свободную длину элементов, работающих на сжатие, существенно сократить их поперечное сечение и массу конструкции в целом.

Схемы анкерных опор для обычных и высокопрочных проводов отличаются углом наклона поясов и схемой расположения раскосов. Для уменьшения усилий в элементах анкерных опор они выполнены с широкой базой, при этом ось поясов совмещена с вектором реакции фундамента при наибольших нагрузках. Каждая «нога» анкерной опоры устанавливается на отдельный фундамент.

Размеры сварных модулей, изготавливаемых на заводе, выбраны таким образом, чтобы обеспечить возможность их компактной погрузки в автотранспорт. Принципиальная схема погрузки приведена на рисунке 4.

СРАВНЕНИЕ МАССЫ И СТОИМОСТИ ВНОВЬ РАЗРАБОТАННЫХ И ТИПОВЫХ ОПОР ВЛ 110 КВ

Для сравнения с новыми промежуточными опорами П110-2С и П110-4С выбраны типовые решетчатые П110-4В и многогранные ПМ110-2Ф конструкции. Анкерная опора У110-2С для обычных проводов сопоставляется с типовой решетчатой У110-2, а У110-4С для высокопрочных проводов — с У220-2 (таблицы 2 и 3).

В расчетах принято:

- труба профильная из атмосферостойкой стали — 54,4 тыс. руб./т;
- изготовление металлоконструкций — 38,0 тыс. руб./т;
- стоимость типовых опор — на основании анализа цен на интернет-ресурсах.

Табл. 2. Масса и стоимость опор ВЛ 110 кВ для проводов АС 240/32, АСку 240/32, АСТ 185/29

Тип опор	Промежуточные			Анкерно-угловые	
Марки опор	П110-4В	ПМ110-2Ф	**П110-2С**	У110-2	**У110-2С**
Геометрия решетки	типовая		новая	типовая	новая
Сталь	С245	С345	14ХГНДЦ класс 345	С245	14ХГНДЦ класс 345
Масса стали (в т.ч. метизы), кг	3191	2713	2233	7696	4415
Изменение массы, %	**143**	**121**	**100**	**174**	**100**
Стоимость опоры, тыс. руб.	292	376	206	704	408
Изменение стоимости, %	**141**	**182**	**100**	**173**	**100**

Табл. 3. Масса и стоимость опор ВЛ 110 кВ для проводов АСВП 258/74 II, АСВТ 190/55

Тип опор	Промежуточные			Анкерно-угловые	
Марки опор	П110-4В	ПМ110-2Ф	**П110-4С**	У220-2	**У110-4С**
Геометрия решетки	типовая		новая	типовая	новая
Сталь	С245	С345	14ХГНДЦ класс 345	С245	14ХГНДЦ класс 345
Масса стали (в т.ч. метизы), кг	3191	2713	2325	14378	6251
Изменение массы, %	**137**	**116**	**100**	**230**	**100**
Стоимость опоры, тыс. руб.	292	376	215	1318	578
Изменение стоимости, %	**136**	**175**	**100**	**228**	**100**

Масса и стоимость новых опор для обеих групп проводов сократились:

– для промежуточных конструкций — в 1,2–1,4 раза;
– для анкерных — в 1,7–2,3 раза.

СРАВНЕНИЕ СТОИМОСТИ 1 км ВЛ 110 кВ НА НОВЫХ И ТИПОВЫХ ОПОРАХ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ОБЫЧНЫХ И ВЫСОКОПРОЧНЫХ ПРОВОДОВ

Для корректных расчетов стоимости 1 км ВЛ 110 кВ рассматривался анкерный участок, состоящий из одной анкерно-угловой опоры и пяти промежуточных.

Для всех пяти проводов определены расчетные пролеты, с которыми сравниваемые опоры могут быть расставлены по трассе.

Кроме стоимости опоры в расчетах учтены затраты на монтаж конструкций. Трудозатраты на сборку решетчатых типовых опор существенно превышают затраты на сборку многогранных или новых сварных опор, которые являются малоэлементными, и количество соединяемых при монтаже элементов у них минимально. Затраты на сборку новых анкерных опор из сварных секций сопоставимы с затратами на сборку типовых промежуточных решетчатых опор.

При оценке стоимости 1 км ВЛ 110 кВ учтены данные о стоимости линейной арматуры и проводов по данным производителей.

Для каждого варианта использования опор с указанными типами проводов (с учетом нагрузок) определены типы фундаментов. Выбор фундаментов сделан для одинаковых грунтовых условий.

При расчетах стоимости участка линии учтена стоимость конструкции фундаментов и их установки (таблицы 4 и 5).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СРАВНЕНИЯ СТОИМОСТИ 1 км ВЛ 110 кВ

1. Стоимости 1 км ВЛ 110 кВ на новых опорах, разработанных для обычных и высокопрочных проводов, сопоставимы. Незначительное отличие (от 1 до 10%) объясняется тем, что при использовании высокопрочных проводов удается сократить стрелу провеса и увеличить расстояния между опорами (сократить количество опор на каждый

Табл. 4. Стоимость участка ВЛ с проводами I группы

Тип опор		Решетчатые		Многогранные		Из профильных труб	
Марки опор		П110-4В	У110-2	ПМ110-2Ф	У110-2	**П110-2С**	**У110-2С**
Тип фундамента		Ф4-2	Ф4-А	СО720.12-5	Ф4-А	СЦФ50.80.4-1	Ф4-А
Стоимость, тыс. руб.	опоры с монтажом	407	979	445	979	275	610
	фундаментов с установкой	180	307	187	307	104	307
Стоимость провода **АС 240/32** — 156,4 тыс. руб./км							
Пролет, м		295	240	295	240	245	215
Стоимость 1 км ВЛ, тыс. руб.		2931		3063		2423	
Изменение стоим. 1 км ВЛ, тыс. руб.		**+508**		**+640**		–	
Стоимость провода **АСку 240/32** — 203,1 тыс. руб./км							
Пролет, м		330	270	330	270	275	240
Стоимость 1 км ВЛ, тыс. руб.		2808		2926		2351	
Изменение стоим. 1 км ВЛ, тыс. руб.		**+457**		**+575**		–	
Стоимость провода **АСТ 185/29** — 207,8 тыс. руб./км							
Пролет, м		285	255	285	255	245	215
Стоимость 1 км ВЛ, тыс. руб.		3136		3271		2577	
Изменение стоим. 1 км ВЛ, тыс. руб.		**+559**		**+694**		–	

Табл. 5. Стоимость участка ВЛ с проводами II группы

Тип опор		Решетчатые		Многогранные		Из профильных труб	
Марки опор		П110-4В	У220-2	ПМ110-2Ф	У220-2	**П110-4С**	**У110-4С**
Тип фундамента		Ф4-2	Ф5А +2Р1-А	СО720.12-5	Ф5А +2Р1-А	СЦФ50.80.4-1	Ф5А +2Р1-А
Стоимость, тыс. руб.	опоры с монтажом	407	1702	445	1702	284	802
	фундаментов с установкой	180	434	187	434	104	434
Стоимость провода **АСВП 258/74** II — 250 тыс. руб./км							
Пролет, м		320	320	320	320	325	295
Стоимость 1 км ВЛ, тыс. руб.		3391		3509		2404	
Изменение стоим. 1 км ВЛ, тыс. руб.		**+987**		**+1105**		**–**	
Стоимость провода **АСВТ 190/55** II — 197,2 тыс. руб./км							
Пролет, м		340	310	340	310	300	275
Стоимость 1 км ВЛ, тыс. руб.		3115		3227		2380	
Изменение стоим. 1 км ВЛ, тыс. руб.		**+735**		**+847**		**–**	

километр ВЛ), но при этом опоры, которые должны выдерживать нагрузки от проводов с повышенным тяжением и с больших пролетов, становятся тяжелее. Общее количество металла на 1 км остается практически тем же.

2. Предложенные типы новых опор из профильных труб при любом из рассмотренных вариантов провода дают минимальное значение стоимости 1 км ВЛ 110 кВ за счет уменьшения массы металла и промежуточных, и анкерных конструкций. Например, при использовании провода АС 240/32 стоимость работ по строительству 1 км ВЛ 110 кВ, учитываемых при сравнении (стоимость опор и фундаментов с учетом их монтажа плюс стоимость проводов и линейной арматуры) составляет 2423 тыс. руб. Разница в стоимости 1 км ВЛ по сравнению с решетчатыми опорами составляет 508 тыс. руб., с многогранными — 640 тыс. руб. При использовании провода АСВП 258/74 II указанная разница составляет – 987 и 1105 тыс. рублей.

3. В целом стоимость каждого километра ВЛ 110 кВ на опорах из квадратного профиля и атмосферостойкой стали сокращается в 1,24 и в 1,46 раза по сравнению с вариантами использования типовых решетчатых и многогранных опор соответственно.

4. Анализ конструктивных особенностей типовых решетчатых опор ВЛ 220 и 330 кВ, схожих с анализируемыми для 110 кВ, позволяет утверждать, что переход к новым шпренгельным системам для всех указанных напряжений при использовании высокопрочных сталей и квадратного профиля приведет к снижению стоимости конструкций и линий электропередачи в целом.

НОВАЯ ОПОРА ВЛ 500 кВ В СРАВНЕНИИ С ТИПОВЫМИ КОНСТРУКЦИЯМИ

Для оценки возможности получения существенной выгоды при использовании квадратного профиля в опорах ВЛ 500 кВ, была разработана промежуточная опора П500-1К. Высота подвески проводов и расчетные условия выбраны по аналогии с типовыми схемами башенной решетчатой «Рюмки» (Р-2) и многогранной портальной (2МП500-5В) опор (рисунок 5).

Башенная конструкция П500-1К, пояса, распорки и элементы траверсы которой выполнены из квадратных труб, в основании своем имеет прямоугольник, большая сторона которого перпендикулярна оси ВЛ. Перекрестные тяги выполнены из круглых стержней. Верхняя часть конструкции в зоне траверсы и тросостоек выполняется из укрупненных сварных элементов, соединяемых на стройплощадке при помощи болтов.

Использование квадратного профиля позволило увеличить свободную длину элементов, работающих на сжатие, сократить количество стыков и облегчить конструкцию в целом.

Результаты сравнения новых опор ВЛ 500 кВ из квадратного профиля с типовыми конструкциями представлены в таблице 6.

Масса опоры из квадратного профиля сопоставима с многогранной опорой и легче опоры из уголкового профиля на 22%.

Стоимость вновь разработанной опоры в 1,5 раза ниже по сравнению с многогранной и на 23% ниже стоимости опоры из уголкового профиля.

С учетом стоимости фундаментов и земляных работ выгода от применения опор из квадратного профиля по сравнению с опорой типа «Рюмка» составляет 204 тыс. руб., а с многогранной — 288 тыс. руб. на опору.

Если принять, что габаритный пролет всех трех сравниваемых опор составляет 370 м (3 × АС 300/66, W = 500 Па, b = 20 мм), то применение опор из квадратного профиля позволяет сократить стоимость 1 км ВЛ 500 кВ на 550 и 778 тыс. руб. по сравнению с «Рюмкой» и многогранником соответственно.

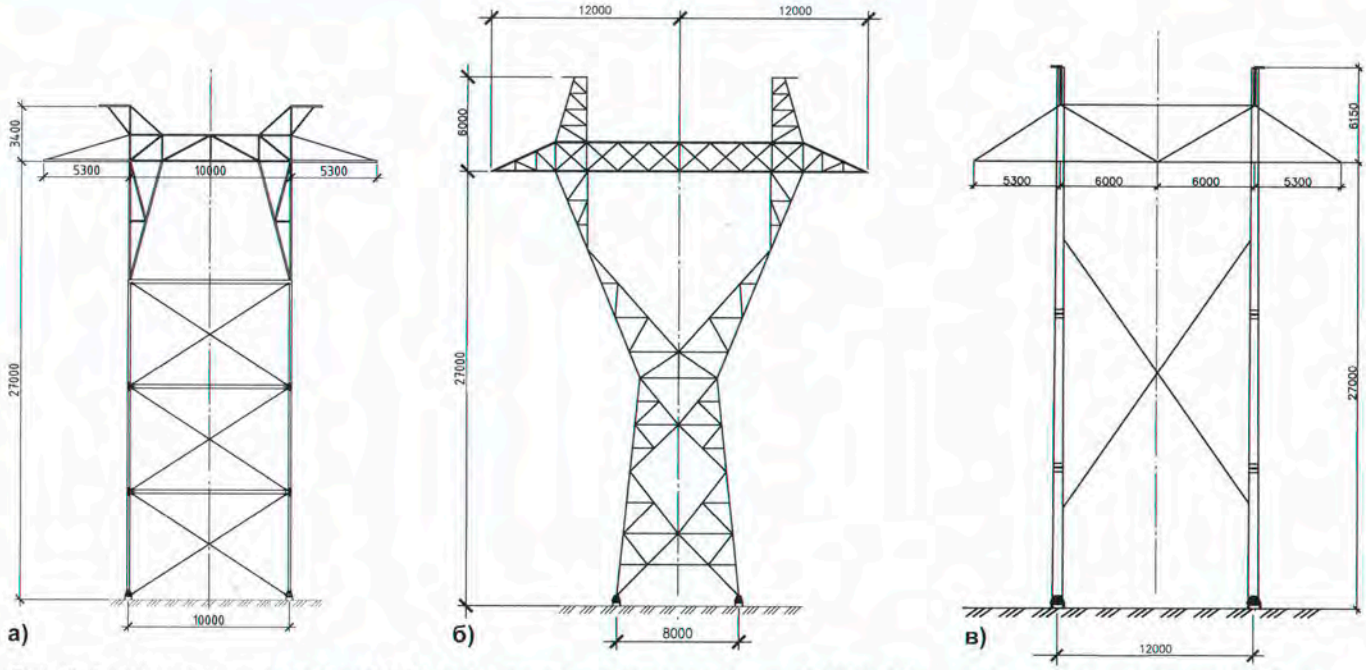

Рис. 5. Промежуточные опоры ВЛ 500 кВ, принятые для сравнения: а) П500-1К из квадратного профиля; б) Р-2, инв. № 3539тм-т.2; в) 2МП500-5В, инв. № 20033тм-т.1

ВЫВОДЫ

Подводя итоги эскизной разработки опор ВЛ 110–500 кВ, можно с уверенностью сказать о целесообразности использования конструкций из квадратного профиля. Доступность профильных труб класса прочности 345, в том числе из атмосферостойкой стали, и наличие современного технологического оборудования для их обработки дает возможность сократить стоимость строительства каждого километра ВЛ напряжением 110–500 кВ на 0,5–1,1 млн руб.

Для массового внедрения новых опор в энергетическое строительство необходима разработка серии унифицированных опор ВЛ 110–500 кВ и нормативной документации для ее применения.

Табл. 6. Масса и стоимость промежуточных опор ВЛ 500 кВ

Марка опоры		**П500-1К**	**Р-2**	**2МП500-5В**
Профиль		квадрат	уголок	многогранник
Сталь		14ХГНДЦ	Ст3	С345
Масса стали, кг		9400	11473	9675
Изменение массы, %		**100**	**122**	**103**
Стоимость, тыс. руб.	металлоконструкций с изготовлением	869	803	1077
	горячей оцинковки	не требуется	270	227
	Итоговая	869	1073	1304
Изменение стоимости, %		**100**	**123**	**150**
Тип фундамента		4×Ф4	4×Ф4	2 сваи, L = 7 м, Ø 0,72 м
Стоимость фундаментов и земляных работ		390	390	463
Общая стоимость, тыс. руб.		**1259**	**1463**	**1767**
Изменение стоимости, тыс. руб.		–	+204	+508
Изменение стоимости, %		**100**	**116**	**140**

ЛИТЕРАТУРА

1. Качановская Л.И., Касаткин С.П. Перспективы использования сталей повышенной прочности и атмосферостойкой стали для решетчатых опор ВЛ // ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение, 2019, № 2(53). С. 42–46.
2. Методика расчета предельных токовых нагрузок по условиям сохранения механической прочности проводов и допустимых габаритов воздушных линий. СТО 56947007-29.240.55.143-2013 ПАО «ФСК ЕЭС».
3. СП16.13330.2017. Стальные конструкции. URL: http://docs.cntd.ru/document/456069588

REFERENCES

1. Kachanovskaya L.I., Kasatkin S.P. Prospects for using of the high-strength steel and weathering steel for lattice poles of overhead transmission lines. *ELEKTROENERGIYa: peredacha i raspredelenie* [ELECTRIC POWER: Transmission and Distribution], 2019, no. 2(53), pp. 42-46. (in Russian)
2. STO 56947007-29.240.55.143-2013. The method for calculating the maximum current loads under the conditions of maintaining mechanical strength of the wires and permissible clearance of overhead lines. Moscow, PJSC "FGC UES" Publ., 2013. 67 p. (in Russian)
3. SR16.13330.2017. *Staljnye konstruktsii* [Steel structures]. URL: http://docs.cntd.ru/document/456069588