

Санкт-Петербургский Политехнический Университет  
Инженерно-Строительный факультет  
Кафедра «Технология, организация и экономика строительства»

УДК 624.04

«СТАЛЬНЫЕ ТОНКОСТЕННЫЕ ХОЛОДНОГНУТЫЕ МНОГОГРАННЫЕ ОПОРЫ  
ВЫСОТНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ 220 кВ»

Автор: Богаченко Д.И. (4 курс, каф. ТОЭС)

Санкт-Петербург

2012

## СТАЛЬНЫЕ ТОНКОСТЕННЫЕ ХОЛОДНОГНУТЫЕ МНОГОГРАННЫЕ ОПОРЫ ВЫСОТНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ 220 кВ

Электроэнергетика является наиболее важной отраслью энергетики, что объясняется такими преимуществами электроэнергии перед энергией других видов, как относительная лёгкость передачи на большие расстояния, распределения между потребителями, а также преобразования в другие виды энергии. Линии электропередач (ЛЭП), являясь основным звеном энергосистемы, вместе с электрическими подстанциями образует электрические сети. Конструктивное решение высотных опор под ЛЭП – задача для инженеров-конструкторов, от результатов решения которой зависят такие основополагающие параметры, как долговечность, надежность и конечная стоимость возводимой линии.

Актуальность данной работы связана с тем, что в настоящее время на ВЛ 220кВ применяются опоры по типовым проектам, которые не позволяют оптимально решить задачу по прохождению воздушной линии над пересеченной местностью (лесами) при условии, что ширина просеки будет заужена.

Компания “Valmont” разработала документацию на стальную тонкостенную холодногнутую многогранную опору ВЛ 220 кВ. При разработке опоры предварительно был проведен технико-экономический анализ по выбору оптимальной конструкции опоры. Аналогичная конструкция опоры прошла тестовые испытания в компании Valmont Industries China на экспериментальном полигоне в г. Пекин (Китай) в 2010 г. (рис. 1).



Рис.1. Испытание высотной опоры г. Пекин

Стальная многогранная опора ПСМ220-2/45 предназначена для применения в III районе по ветру и III район по гололеду в ненаселенной местности. Т.к. расчетная температура наиболее холодной пятидневки минус 43 ° С, то стальная многогранная опора разрабатывалась

при условии, что сталь марки ASTM 572 отвечает нормативным требованиям по хрупкости. Опора разработана одностоечной свободностоящей с двухсторонним расположением проводов с многогранными траверсами для применения в местностях типа «А». Опора устанавливается на фундамент, соединяемый с нижней секцией опоры с помощью фланцев. Для болтовых монтажных соединений применяются болты нормальной точности В класса прочности 8.8 и гайки класса прочности 6.

Стальная многогранная опора В Л 220 кВ защищена от коррозии в соответствии с Российским стандартом СНиП 2.03.11-85 «Защита строительных конструкций от коррозии». Применяется горячее оцинкование толщиной 80-100 мкм в заводских условиях. При разработке опоры предварительно был проведен технико-экономический анализ по выбору оптимальной конструкции опоры. При анализе рассматривались одностоечная опора, опора в виде Y-опоры и опора в виде H-опоры. При анализе выбиралась оптимальная высота опоры для прохождения над лесами из условий провиса провода, перепада рельефа местности и т.д. В результате анализа было определено, что конструкции опор в виде Н и Y имеют более высокую стоимость и менее технологичный способ монтажа в условиях ограниченной строительной площадки и резкоконтинентального климата. Поэтому за основу была принята одностоечная опора.

Также одним из решающих факторов по выбору одностоечной конструкции опоры стало то, что аналогичные высотные конструкции были спроектированы и установлены при прохождении над лесами и уже эксплуатируются около 10 лет, что подтверждает надежность данной конструктивной схемы (см. рис. 2).



Две опоры высотой 65,0м напряжением 132 кВ установленные в Австралии. 2000г.



Опора высотой 72,0м напряжением 220 кВ установленная в Китае. 2008г.

Рис. 2. Высотные опоры над лесами

Высота опоры принималась исходя из следующих предпосылок:

1. Так как опора высотная, то обслуживание предполагается без телескопических вышек, соответственно для быстроты обслуживания путь подъема по опоре монтажника должен быть минимальным
2. В случае монтажа опоры краном имеются ограничения по доступной технике с необходимым вылетом стрелы и грузоподъемностью и возможность работать в стесненных условиях узкой просеки.
3. Исходя из условий провиса провода и соблюдения всех габаритных расстояний по ПУЭ-7. Для провода АС 240/32 расчетная величина провиса составляет 17,0м для пролета 280,0м. В случае увеличения величины пролета до 450м и соответственно провиса до значения в 60,0м необходимо разработать конструкцию с высотой до нижней траверсы в 85,0м, что повлечет за собой невозможность транспортировки и монтажа конструкции ввиду отсутствия специальной техники для данных климатических условий.

Таким образом, наиболее оптимальной величиной является высота 45,0м до нижней траверсы и высота опоры в целом 65,0м (см. рис. 3) исходя из среднегабаритного пролета и с учетом вышесказанных замечаний.

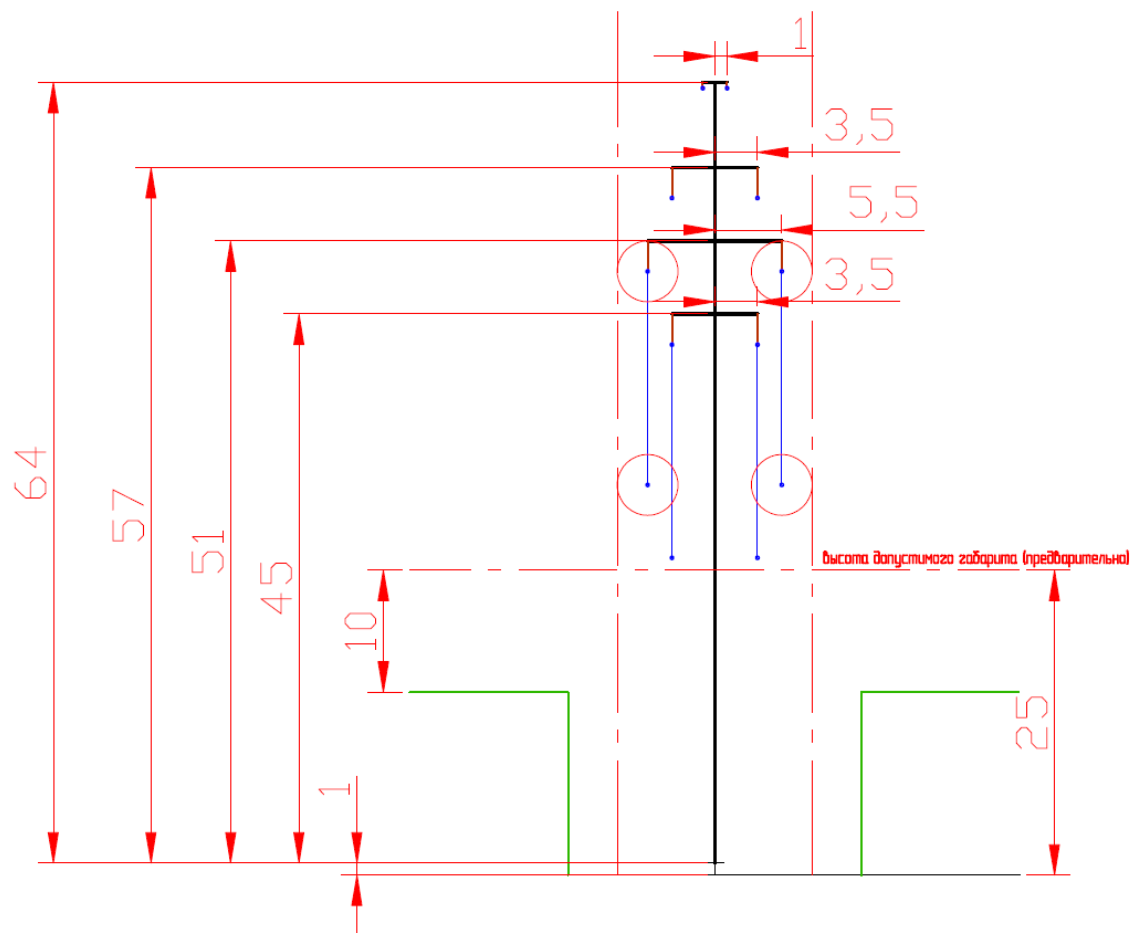


Рис. 3. Схема опоры

На опоре предусмотрена подвеска сталеалюминиевых проводов марки АС240/32 по ГОСТ 839-80. В качестве грозозащитного троса предусмотрен стальной канат ТК70. Тип проводов принимался по решениям проектного института.

Максимальное напряжение в проводах принято равным допустимому напряжению по ПУЭ 7 издания и равным:

- при наибольшей нагрузке и низшей температуре 126 МПа,
- при среднегодовой температуре 84 МПа;
- для грозозащитного троса 410 МПа.

На опоре для крепления проводов используются поддерживающие гирлянды изоляторов с полимерным изолятором ЛК-70/220. Крепление гирлянды изоляторов осуществляется на конце траверсы, это обеспечивает удобство технического обслуживания. Для установки изоляторов (сопряжения с опорой Valmont) был разработан стандартный узел крепления. В случае крепления изоляторов иностранного производства узел оперативно адаптируется под требования заказчика. Для монтажа проводов, изоляторов и подъема вспомогательного оборудования траверса снабжена малым монтажным приспособлением. Узел траверсы смотри на рисунке 4. Крепление грозозащитных тросов должно выполняться при помощи двух или более изоляторов.

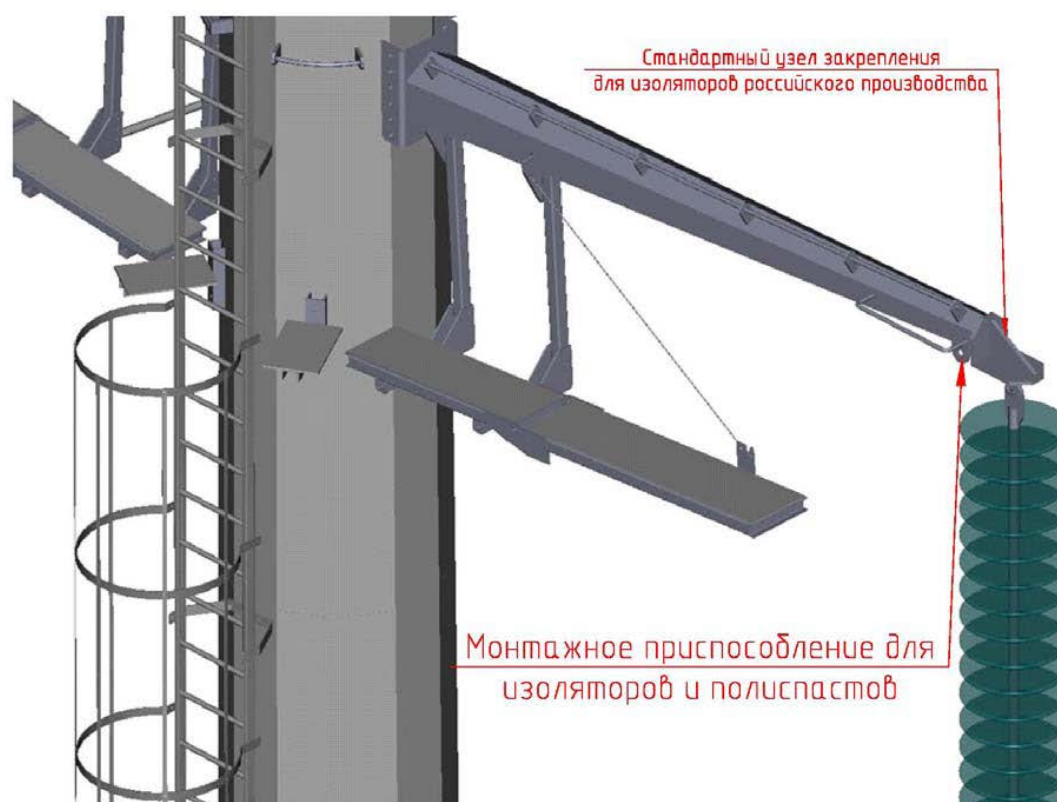


Рис. 4. Узел траверсы для монтажа и закрепления изоляторов

Расчет опоры выполнялся в соответствии с ПУЭ-7 и СНиП II-23-81 «Стальные конструкции» и по таблицам нагрузок на опору, предоставленных проектной организации. Стальная многогранная опора рассчитаны по методу предельных состояний, основные положения которого, направлены на обеспечение безотказной работы конструкций с учетом изменчивости свойств материалов, нагрузок и воздействий, геометрических характеристик конструкций, условий их работы, а также степени ответственности, проектируемых объектов, определяемой материальным и социальным ущербом при нарушении их работоспособности. Опора, фундаменты и основания рассчитывались на сочетания расчетных нагрузок нормальных режимов по первой и второй группам предельных состояний и аварийных и монтажных

режимов ВЛ по первой группе предельных состояний. Расчет оснований по деформациям производился на нагрузки второй группы предельных состояний с учетом динамического воздействия порывов ветра на конструкцию опора. Расчеты показали, что отклонение верха опор при воздействии расчетных нагрузок по второй группе предельных состояний не приводит к нарушению установленных ПУЭ-7 наименьших изоляционных расстояний от токоведущих частей (проводов) до заземленных элементов опоры и до поверхности земли и пересекаемых инженерных сооружений.

Расчет производился по деформированной схеме. Величина отклонения вершины стальной многогранной опоры при расчете принималась с учетом прогиба вершины многогранной стойки, наклона фундамента в грунте, деформации стыков секций опоры и допусков при установке опоры. Нормативное ветровое давление принято по таблице 2.5.1 ПУЭ 7 издания –650 Па. Расчет опоры и проводов выполнялся с учетом коэффициента  $K_w$ , учитывающего высоту приложения нагрузки и тип местности. Нормативная толщина стенки гололеда принята по таблице 2.5.3 ПУЭ 7 –20 мм. Региональный коэффициент принят на основании опыта эксплуатации и равен 1. Ветровые пролеты определены по деформированной схеме с учетом дополнительных усилий, возникающих от весовых нагрузок. Величины пролетов следующие:

Ветровой пролет – 390 м

Весовой пролет – 450 м

Габаритный пролет – 280 м

Для закрепления опоры в грунте разработано два варианта фундаментов для нагрузок.

Закрепление опоры выполняется на фундаменте, представляющем собой:

- по первому варианту (см. рис. 5) металлический фундамент из ферм, опирающихся на металлические плиты. Фундамент заводского изготовления. Фундамент устанавливается на глубину 2,7м в котлован разработанный экскаватором ЭО 33211 и имеет размеры в плане 12х12м. Данный фундамент позволяет исключить бурение скважин и монолитные работы в условиях вечной мерзлоты и зимнего производства работ. На строительную площадку доставка фундамента осуществляется отдельными блоками, которые собираются в единую конструкцию в котловане. Производство строительных работ не требует особых рекомендаций и выполняется в рамках российских нормативов. Работы по монтажу начинаются с установки металлических плит и их калибровке по высоте и месту. Т.к. конструкции в сборе будут иметь большой вес, то правильная установка плит очень важна. Затем собираются фермы и устанавливаются на плиты. Затем устанавливается труба с фланцем для крепления опоры. Все соединения болтовые. Материал конструкции – сталь С235.

- по второму варианту (см. рис. 6) стальной свайный фундамент. Данный фундамент имеет меньшую массу, но требует специальной техники для проведения буровых работ в зимний период. Техника для буровых работ принята по каталогу Liebherr. Данная техника позволяет выполнять буровые и забивные работы с помощью одной машины. Вся техника прошла сертификацию и испытана в условиях работы на территории РФ.

Вариант фундамента выбирается на основании проекта производства работ монтажной организацией в зависимости от времени работ (зима-лето) и наличия необходимой ресурсной базы.

Предусмотрена антикоррозийная защита фундаментов. Предусмотрена электрохимическая защита. Электрохимическую защиту необходимо предусматривать совместно с изоляционными покрытиями, а в жидких средах допускается предусматривать совместно с окрашиванием

лакокрасочными материалами III и IV групп. Проектирование электрохимической защиты стальных конструкций выполняется специальной проектной организацией.

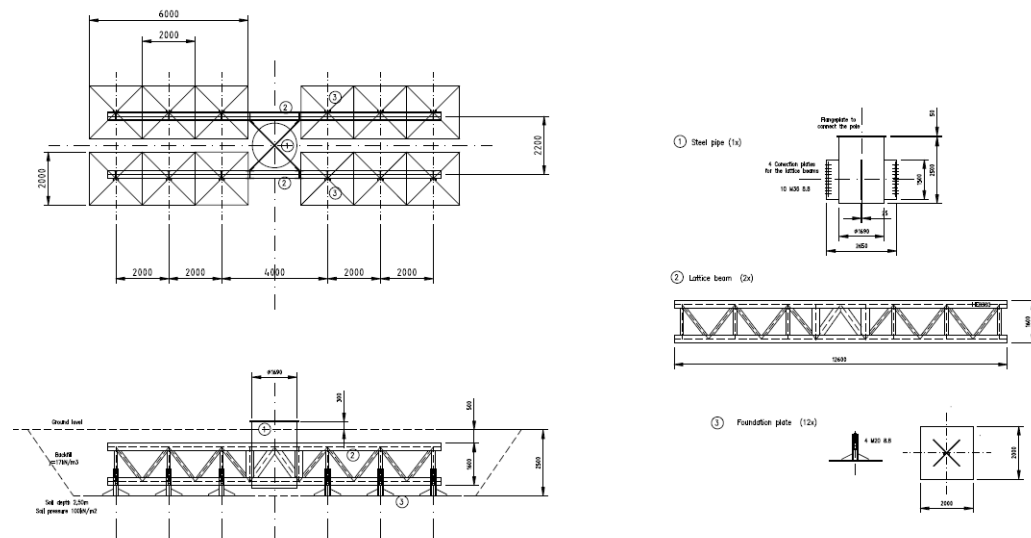


Рис. 5 Металлический фундамент неглубокого заложения

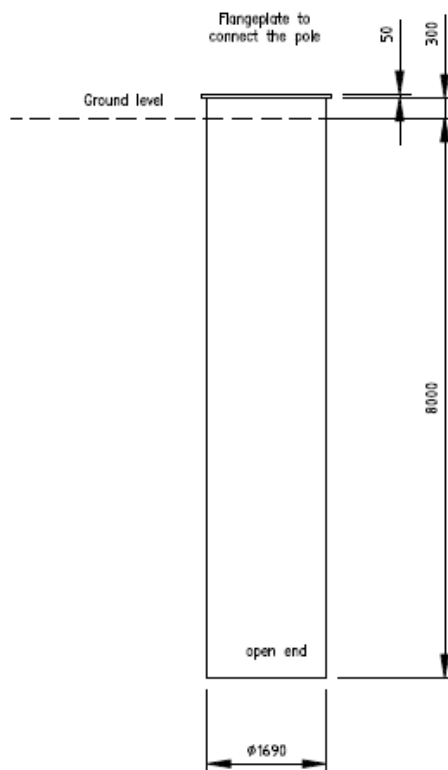


Рис. 6 Стальной металлический фундамент-свая

Стальная конструкции опоры подлежит проверке на месте установки. Допускаемые отклонения от проектных размеров должны соответствовать требованиям технических условий Valmont. При производстве работ необходимо учитывать общие требования компании Valmont. Предлагается два способа монтажа опоры – краном и вертолетом (в труднодоступной местности).

В первом варианте установка собранной опоры производится с помощью крана Liebherr LR 1100 с соответствующей грузоподъемностью и вылетом стрелы. Монтажную схему опоры смотри на рис. 7. При этом секции опор, собранные с помощью телескопического стыка, не имеют фиксаторов стыков. Фиксация стыков осуществляется с помощью гидравлического домкрата по схеме указанной на рисунке №8 при этом длина соединения должна находиться в пределах технических условий компании Valmont по схеме на рисунке №9.

Вылет и рабочий ход стрелы подъема крана обеспечивают полный подъем опоры, перемещение ее к месту установки и удержание в вертикальном положении до закрепления опоры на фундаменте. Кран на гусеничном шасси, а следовательно, если не болотистое место то проблем с передвижением не возникает. Радиус поворота при максимальном (в соответствии с потребностью) вылете (при максимальной комбинации стрелы – 68 м, макс угол наклона стрелы составит  $70^\circ$  (вылет 24м если поперек просеки)), вдоль просеки затруднений не возникает. От ж.д. станции до места применения техники, краны доставляются автотранспортом и при отсутствии нормальных дорог.

Предложено два варианта монтажа опоры: методом подъема собранной опоры на земле и методом наращивая. Вариант производства работ выбирается на основании проекта производства работ монтажной организацией.

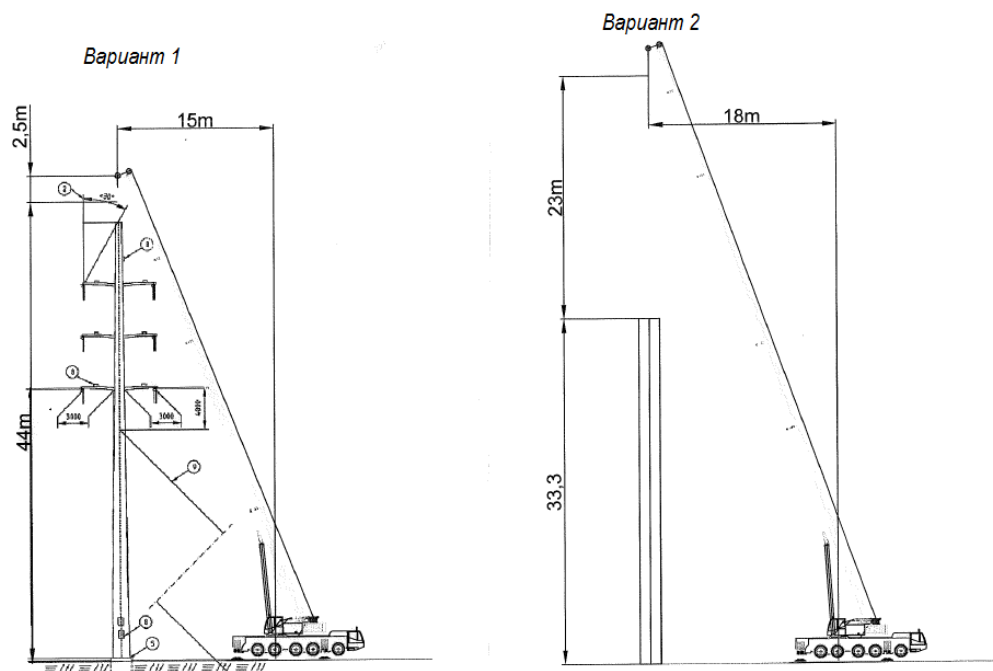


Рис. 7 Монтажная схема опоры



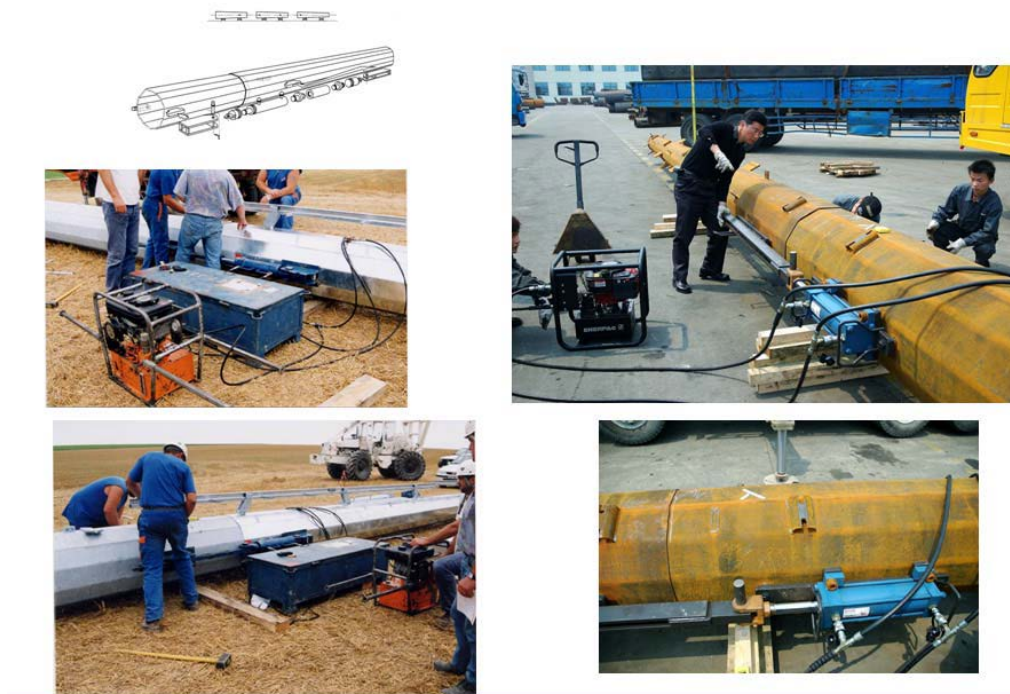


Рис. 8 Соединение секций домкратом

Монтаж опор необходимо осуществлять в определенной последовательности. Предусматривается два варианта закрепления фундамента в грунте. Опора устанавливаются на стальные фундаменты. Котлованы под фундаменты металлических опор разрабатываются экскаваторами. Второй вариант – заглубление металлических свай в грунт выполняется виброударным способом. Перевозка опор до места установки на трассе ВЛ осуществляется специальными стеловозами на базе «Урал». Разгрузка опор выполняется, как правило, подъемными кранами которыми потом осуществляется монтаж Liebherr LR 1100 или кранами типа «Ивановец». Поставка строительной техники на трассу ВЛ осуществляется своим ходом или на специальных автомобильных платформах. Металлические опоры поставляются отдельными элементами, сборка которых между собой выполняется с помощью стыковых соединений.

Во втором варианте монтаж опоры ведется вертолетом. Технологический цикл при монтаже включает в себя следующие этапы:

- перелет к месту складирования опор (см. рис. 9);
- строповку за специальные проушины на секции опоры;
- перелет к месту монтажа (см. рис. 10);
- зависание;
- монтаж (см. рис. 11).

Находящиеся сверху недостроенной опоры двое рабочих ловят спускающееся звено за тросы, третий рабочий машет вертолету белыми флажками. Рабочие располагаются на специальных инвентарных площадках, установленных при производстве опоры. Фиксация от падения монтажника осуществляется страховочным тросом за поручень секции, установленный при производстве опоры. закрепление секции опоры и освобождение вертолета от груза. Когда звено встаёт на место, рабочие быстро его стягивают гидравлическим прессом. Затем рабочие

сбрасывают тросы вниз и передвигаются дальше вверх по лестнице секции, монтировать следующее звено.

Зависание производится над местом монтажа на такой высоте, чтобы опора была на расстоянии 2-3 м от него. Ориентация осуществляется чаще всего бригадой монтажников за фалы, закрепленные на секции опоры.

Перед выполнением СМР выполняется ряд подготовительных операций:

- изготавливаются направляющие ловушки, фиксирующие приспособления на стыковочных узлах;
- подготавливается в районе монтажа место для свободного размещения на нем членов бригады, занимающихся монтажом и креплением конструкции;
- в поле зрения пилота, выполняющего монтаж, расставляются ориентиры, по которым он должен держать вертолет над объектом монтажа;
- экипаж вертолета должен быть обучен полетам, связанным с перевозкой и монтажом грузов на внешней подвеске;
- экипаж должен тщательно рассчитать полетную массу вертолета; При этом необходимо исходить из того, чтобы вертолет висел вне зоны влияния "воздушной подушки" и имел запас мощности двигателей для выполнения маневра.

На монтаж одной секции опоры требуется примерно 30 мин. Опора монтируется за 5 часов.

Выполнение полетов при монтаже возможно:

- вертолетом Ми-8Т массой груза до 5 т. Выполнение полетов по подъему вертолетом Ми-8Т одностоечных опор ЛЭП не требует, режимов, выходящих за пределы "Руководства по ЛЭ вертолета Ми-8Т". В условиях лесных просек или в других стесненных условиях, когда на первоначальной стадии, подъема винт вертолета работает в непосредственной близости от препятствий при обрыве троса внешней подвески на вертолете Ми-8Т аварийной ситуации не возникает и для парирования отклонения запасы рулей по всем каналам управления достаточны.

- вертолетом Ка-32 с использованием штатного оборудования вертолета с общей длиной тросов внешней подвески от 10 до 40 м, выбираемой в зависимости от характера подстилающей поверхности, рельефа местности и высоты устанавливаемых опор. Область применения Ка-32 при монтаже опор допускает установку секций, масса которых колеблется от 1,5 до 5,0 т.

- вертолета Ми-26. При достаточной слетанности экипажа, наработке навыков операторов, отработке взаимодействия с наземной бригадой возможно применение вертолета Ми-26 при монтаже опор массой секций от 5 до 14 т. Установка опор возможна при полетной массе вертолета Ми-26 до 52 т, силе ветра до 5 м/с при отсутствии болтанки на высотах до 1100 м. Для визуализации ветровой обстановки на горном пикете было рекомендовано применять интенсивные источники дыма, например, посадочные шашки.

Вариант производства работ выбирается на основании проекта производства работ монтажной организацией. Рекомендуется обратиться в специализированную организацию за разработкой проекта производства работ.



Рис. 9 Применение вертолета Ка-32 в электросетевом строительстве Швейцарии



Рис. 10 Вертолёт поднимает очередное звено в воздух.

Для подъема персонала на опору предусмотрены следующие мероприятия (выбирается по согласованию с заказчиком):

- 1) на каждой стойке выполнены специальные ступеньки (степ-болты) на одном поясе или лестницы без ограждения, доходящие до отметки верхней траверсы.
- 2) на каждой стойке выполнены площадки (трапы) с ограждениями. Трапы с ограждениями выполнены также на траверсах этих опор. На опорах с траверсами обеспечена возможность держаться за тягу при перемещении по траверсе.
- 3) по инвентарным лестницам или с помощью специальных инвентарных подъемных устройств.

Конструкция опоры обеспечивает удобные и безопасные подъем персонала на опору от уровня земли до вершины опоры и перемещение по элементам опоры (стойкам, траверсам, тросостойкам, подкосам и др.). На опоре и ее элементах предусмотрена возможность крепления специальных устройств и приспособлений для выполнения эксплуатационных и ремонтных работ.

Для обеспечения безопасного перемещения обслуживающего персонала по траверсам переходных опор высотой предусмотрены площадки и страховочный крюк.

В качестве основного варианта по доступу для обслуживания изоляторов и осмотру опоры рассматривается стационарная площадка, расположенная ниже уровня траверсы на 1,1 м. Площадку смотри на рисунке №12. Площадка состоит из стационарной части и подвижного трапа. Во время, когда обслуживание не проводится, подвижный трап располагается в вертикальном положении. В случае обслуживания, мобильный трап принимает горизонтальное положение (см. рис. 13) и обеспечивает подход к концу траверсы. Для осмотра изоляторов по вертикали применяется инвентарная лестница (см. рис. 14), которая поднимается с помощью полиспастов, временно закрепляемых на конце траверсы. Лестница жестко фиксируется на траверсе.

Для перехода с вертикальной лестницы на площадки обслуживания траверс предусмотрены разрывы (отсутствуют дуги ограждения) в лестнице, дополнительно на опоре установлены переходные площадки и поручни.

Для безопасного передвижения монтажника вдоль траверсы предусмотрен поручень на траверсе, за который закрепляется страховочный трос с крюком.

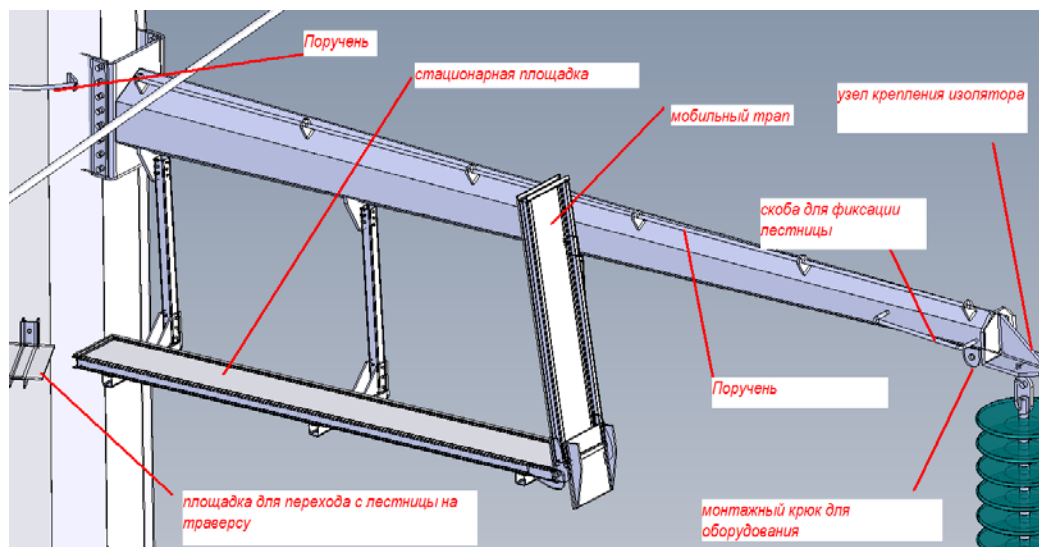


Рис. 12. Площадка для доступа к изоляторам в режиме когда обслуживание не проводится

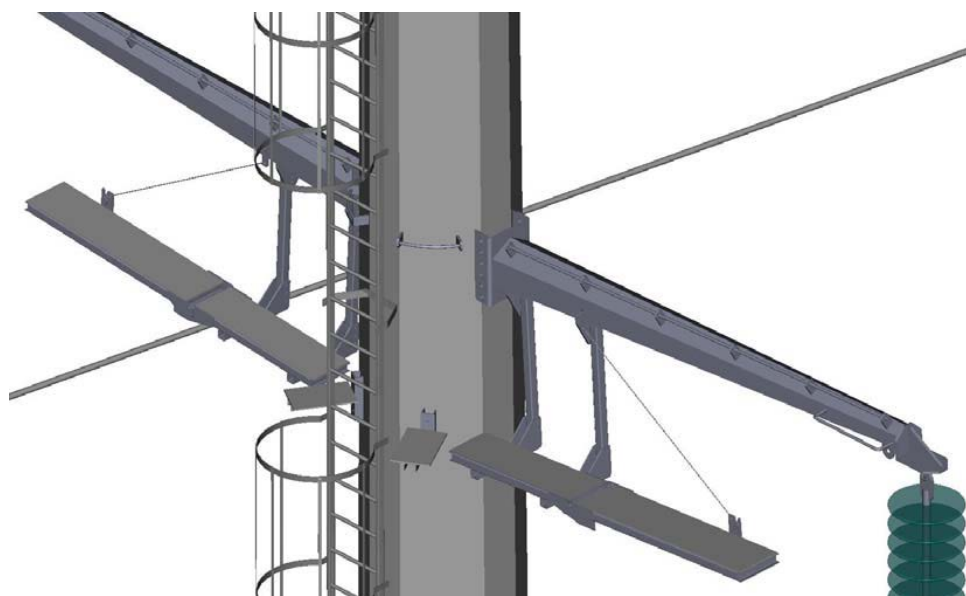


Рис. 13. Площадка для доступа к изоляторам в режиме обслуживания изоляторов

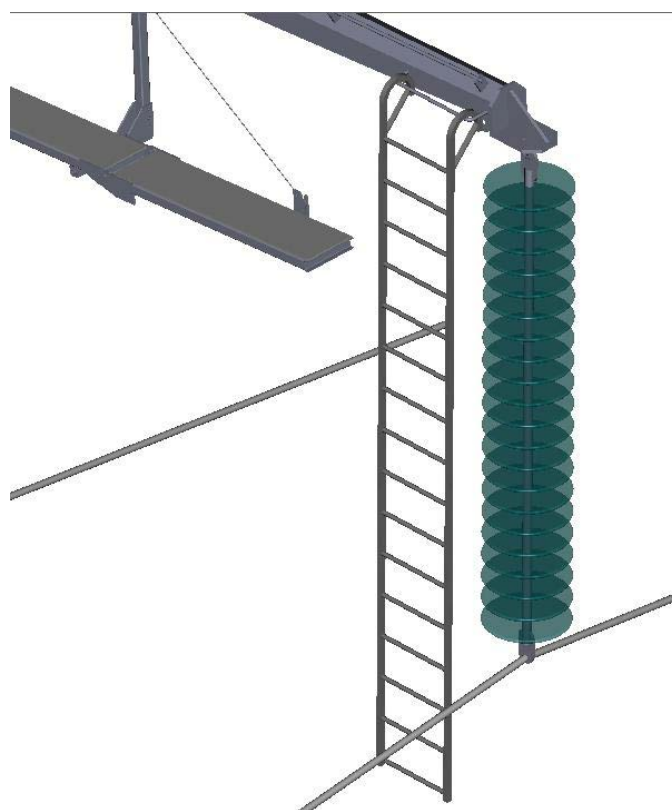


Рис. 14. Инвентарная лестница для доступа к изоляторам в режиме обслуживания изоляторов

Доступ к грозозащитным тросам осуществляется с помощью малых площадок обслуживания. Для предотвращения монтажника от падения предусмотрена дега поручня, за которую крепиться страховочный трос с крюком (см рис. 15).

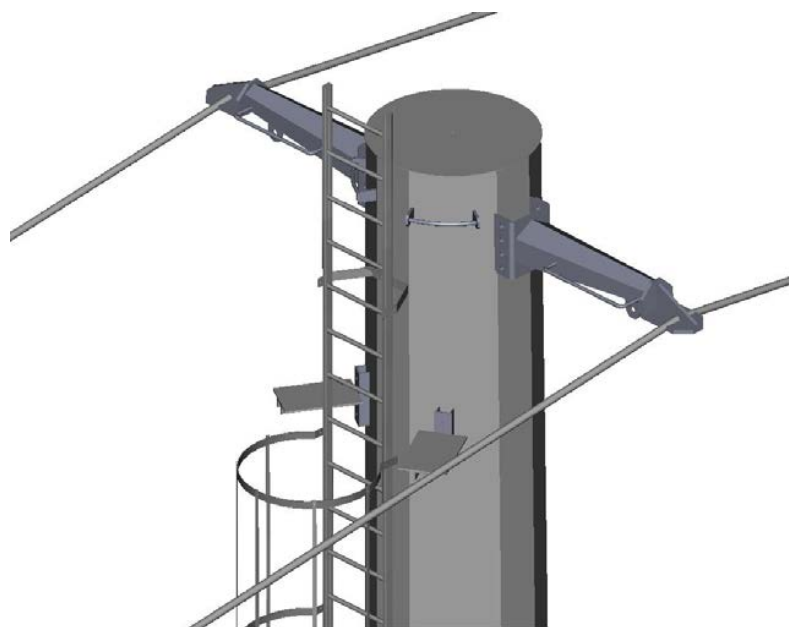


Рис. 15. Площадка для доступа к тросостойкам

По согласованию с заказчиком, для дополнительной защиты от падения, устанавливается страховочный профиль (см. рис. 16).

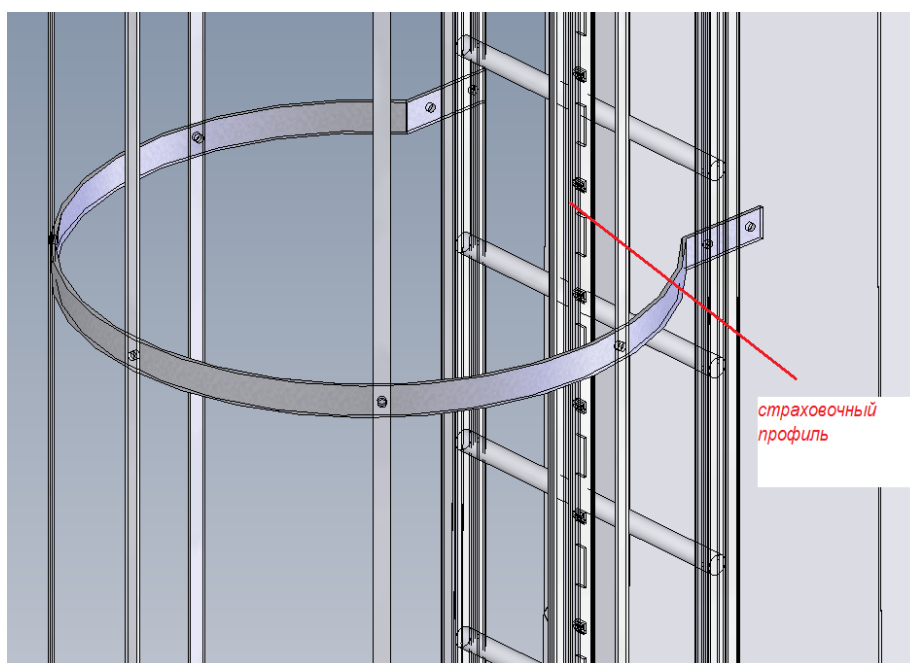


Рис. 16. Лестница с дугами ограждения и страховочным устройством для обслуживания опоры

Для безопасного обслуживания и отдыха монтажника, на опоре каждые 8,0м устанавливаются площадки для отдыха (см. рис. 17) или откидные ступени-площадки (см. рис. 18). Тип оборудования выбирается по согласованию с заказчиком.

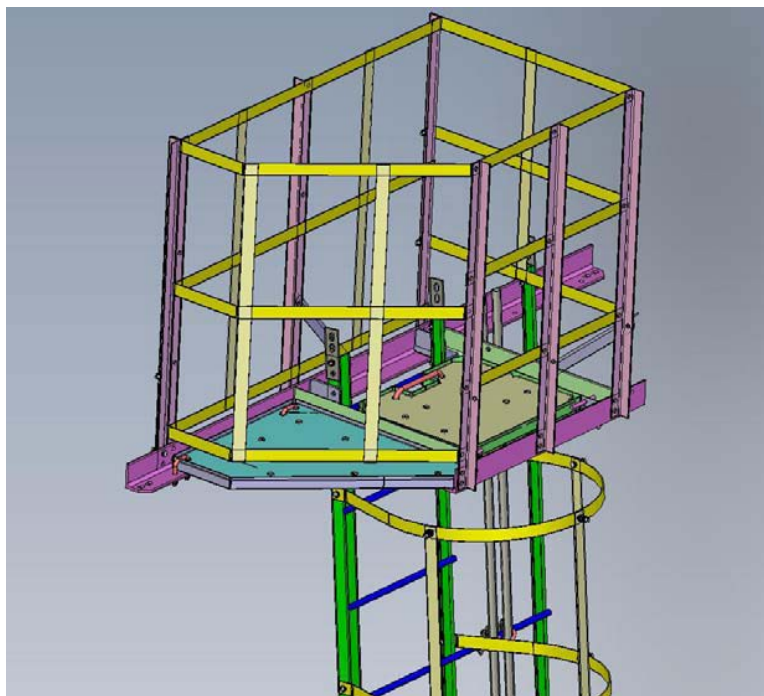


Рис. 17. Площадка для отдыха, устанавливаемая каждые 8м по лестнице

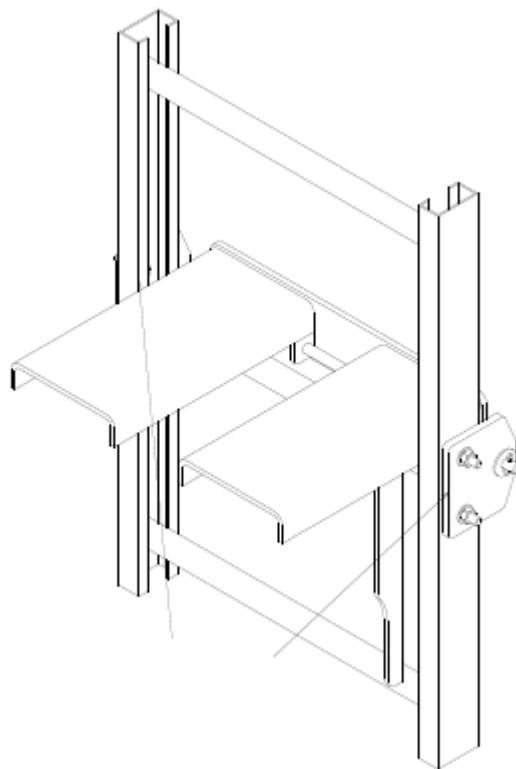


Рис. 18.0 Откидные ступени для отдыха, устанавливаемая каждые 8м по лестнице

Доступ на опору обеспечивается без телескопических вышек от самого основания опоры (см. рис. 19). Для ограничения несанкционированного доступа на опору устанавливается на высоте

8,0м антивандальная защита (см. рис. 20) с площадкой для отдыха. Люк площадки запирается на замок.

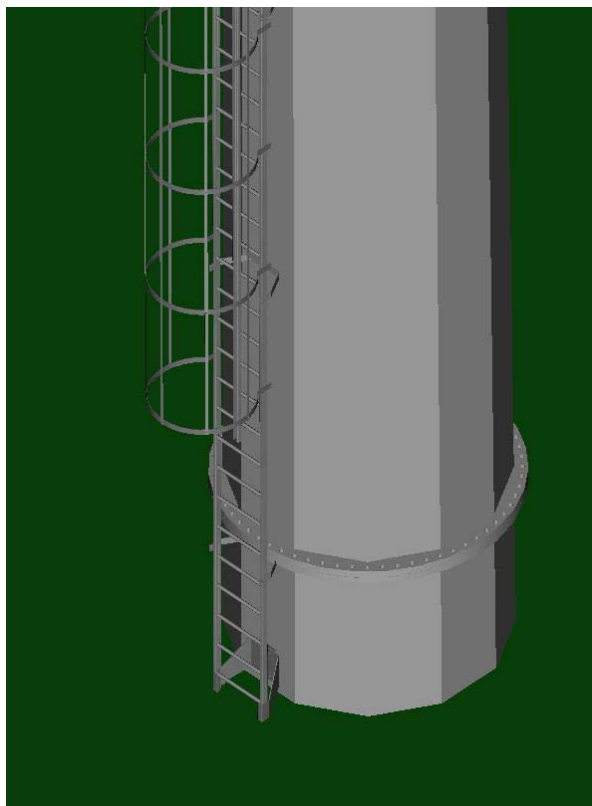


Рис. 19. Доступ на опору

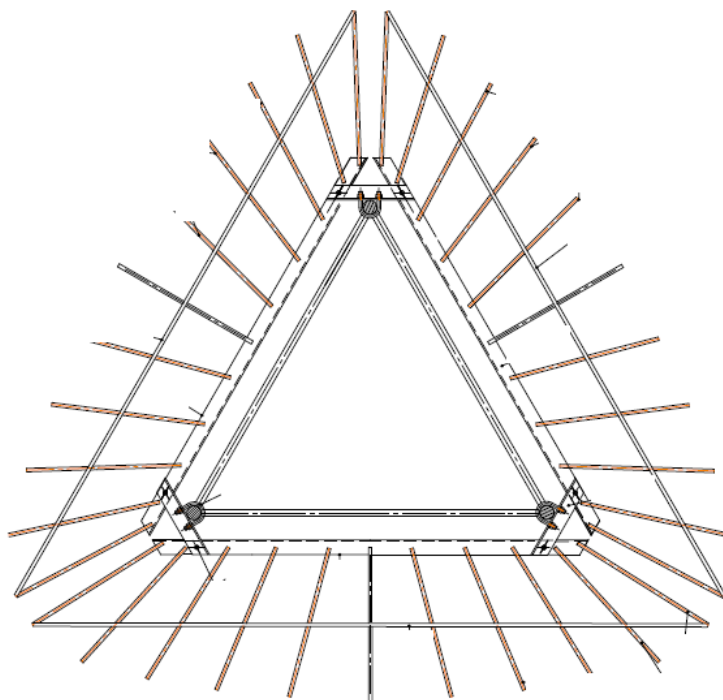


Рис. 20. Антивандальная защита для ограничения доступа на опору.



Транспортирование и хранение стальных конструкций опор должны производиться в соответствии с техническими условиями, разработанными Valmont. Укладка стоек в штабеля должна производиться с использованием деревянных прокладок. Высота штабеля должна быть не более 2 м. Схему укладки опор при транспортировке и хранении смотри на рисунке №21.



Рис. 21. Укладка секций опоры при транспортировке. Размеры и массы секций не превышают стандартных величин, поэтому при разгрузке и транспортировке можно использовать стандартное оборудование отечественного производителя (а/м Урал, кран типа «Ивановец»). Схему загрузки опор смотри на рисунке № 22.



Рис. 22. Схема погрузки-разгрузки опор

### Экономическое сравнение опор

Параметр	Опора ПСМ220-2/45 сталь А 572	Опора Аналог
Вес ствола опоры включая метизы, т	36,30	83,0т
Вес лестницы для подъема на опору и трапы, т	0,52	-----
Вес фундамента, т	22,1 (вар. 1) или 2,4 (вар. 2)	-----
Итого общий вес металлоконструкций, т	39,22 (вар. 2)	83,0т

**Выводы** Металлоконструкции и фундаменты опоры ПСМ220-2/45 производства Valmont испытывают нагрузки, не превышающие допустимые и удовлетворяют требованиям прочности, деформативности и устойчивости. Отвечают всем нормативным требованиям по эксплуатации и производству строительных работ, имеют очевидную экономическую эффективность в сжатые сроки, что позволяет установить всё запланированное технологическое оборудование на линии «Харанорская ГРЭС – РП Маккавеево» (см. рис. 23).



Рис. 23. Планируемая к установке опора ПСМ 220-2/45 (дизайн-проект).

Для экономического обоснования применения данного вида опор было проведено сравнение технико-экономических показателей опор на расчетном участке ВЛ220кВ 5 км.

**Таблица 1. Сравнение технико-экономических показателей опор ВЛ220кВ**

Марка опоры	ПМ220-1	ПБ220-1	ПС220-5
Стойка	многогранная	Железобетонная	Решетчатая
Расчетный пролет по ПУЭ 7 изд. для III района по нагрузкам, м	320	160	340
Количество промежуточных опор на 5 км ВЛ, шт.	15	31	14
Масса опор на 5 км ВЛ, т	115	277	425
Площадь отчуждаемой земли под опоры ВЛ, м <sup>2</sup>	230,0	310,5	812,0
Общая стоимость строительства, тыс. руб.	10584,105	10613,039	14194,034

Результаты расчетов показывают, что применение на ВЛ220кВ стальных тонкостенных холодногнутых многогранных опор позволяет снизить стоимость строительства ВЛ на 25% по сравнению со стальными решетчатыми опорами. Стоимость строительства ВЛ на многогранных опорах и на железобетонных опорах примерно одинакова.

Расчетный изгибающий момент многогранной опоры на уровне вланцев равен 870 кНм, что почти в два раза превышает прочность железобетонной стойки. В связи с этим расчетный пролет для многогранной опоры в два раза превышает пролет для железобетонных опор (320 м против 160 м), отсюда – меньшее количество опор на линии, что существенно сокращает трудоемкость возведения линии.

В связи с полученными результатами целесообразно применение стальных тонкостенных холодногнутых многогранных опор на ВЛ220кВ в различных районах страны, в первую очередь в III районе по ветровым и гололедным нагрузкам. Также, целесообразно использовать многогранные опоры на ВЛ330 и 500 кВ, совместно с решетчатыми опорами в качестве анкерно-угловых.

1. CSN EN 50341-1 - Overhead electrical lines exceeding AC 220 kV - Part 1: General requirements - Common specifications
2. ПУЭ 7: Правила устройства электроустановок. Седьмое издание.
3. Раппопорт А.Н., Горюнов П.В. Практические рекомендации по оценке эффективности и разработке инвестиционных проектов и бизнес-планов в электроэнергетике. Второе официальное издание дополненное и переработанное. Москва, 1999