

EDN: HCKUKK

УДК 621.315.1+621.315.66

В. Н. ВАСЫЛЕВ^а, Л. А. ГАВРИЛОВА^б, Р. И. ИГНАТЕНКО^а^а ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,^б ООО «ГПК ИНЖИНИРИНГ»

АНАЛИЗ УЗЛОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ РЕШЕТЧАТЫХ БАШЕННЫХ ОПОР ЛЭП

Аннотация. В данной статье систематизированы и исследованы возможные варианты разработки наиболее экономичной конструкции металлических решетчатых башенных опор (МРБО) ЛЭП в месте сопряжения. Большая часть эксплуатируемых ВЛ значительно превысили срок службы, запланированный при их проектировании и возведении. Поэтому актуальной проблемой поддержания безаварийной работы является ремонт и замена отдельных МРБО в пределах ВЛ. В статье определены значимые факторы проектирования доставки, сборки, монтажа и эксплуатационной работы конструкций МРБО с учетом конструктивных ограничений и требований технологии изготовления. Произведены систематизация, исследование и анализ узлов сопряжений опор с учетом значимых факторов, особенно типа болтовых соединений. Рассмотрен вариант разработки более экономичной конструкции с переходом от одноболтового соединения элементов к двухболтовому, что позволяет снизить суммарную массу конструкции на 8...12 %. По результатам работы составлен альбом узлов.

Ключевые слова: воздушная линия электропередачи (ВЛ); металлическая опора; элементы ствола опоры; узлы сопряжений опор.

ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ

Одним из важных факторов, учитываемых при проектировании металлических башенных опор ЛЭП является технологичность изделия. При сборе металлических башенных опор ЛЭП используются болты различного диаметра, что влечет за собой увеличение количества комплектующих элементов и увеличение времени монтажа. Переход к болтам одного диаметра позволил бы ограничить номенклатуры применяемых комплектующих в изделии, снизить трудозатраты и общее время монтажа конструкции. Также предполагается повышение общей технологичности конструкции. Возможность постановки болтов стандартизированного диаметра на элементы проката различного сортамента не до конца изучено.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование параметров организационно-технологического оформления болтовых соединений при сборке металлических башенных опор ЛЭП. Определение коэффициента технологичности опор с болтовыми соединениями при постановке болтов унифицированного диаметра.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

Энергетическая система России насчитывает в общей сложности 10700 линий электропередач класса напряжения 110...150 кВ [1]. Протяженность ЛЭП 0,4 кВ составляет 737 тыс. км или 40 % от общей протяженности ЛЭП, протяженность ЛЭП 6...35 кВ составляет 663 тыс. км или 36 % от общей протяженности ЛЭП, протяженность ЛЭП 110 кВ и выше составляет 442 тыс. км или 24 % от общей протяженности ЛЭП [2].

На территории Российской Федерации и ДНР значительная часть высоковольтных линий электропередач выполнена на металлических решетчатых башенных опорах (МРБО). Количество МРБО составляет 85...90 % от общего количества опор на высоковольтных ЛЭП [3].



Более 30 % ВЛ 110...220 кВ были построены 30 лет назад. Около 25 % ВЛ 110...220 кВ 30-40 лет назад. Более 9 % ВЛ были построены 40–50 лет назад и более. Более 65 % ВЛ значительно превысили срок службы, запланированный при их проектировании и возведении. Поэтому актуальной проблемой поддержания безаварийной работы является ремонт и замена отдельных МРБО в пределах ВЛ.

Учитывая значительную протяженность ВЛ и общее количество МРБО в системе энергораспределения поиск рациональных проектных решений пространственных стержневых конструкций даст значительный экономический эффект.

Наиболее часто отказывают в работе элементы ствола опоры и узел опирания ствола на фундамент. Большая частота отказов узла опирания объясняется значительными коррозионными поражениями нижних частей опор ВЛ и большими величинами усилий, воспринимаемых узлом [4].

Проектирование доставки, сборки, монтажа и эксплуатационной работы конструкций МРБО с учетом конструктивных ограничений и требований технологии изготовления – сложная многофакторная задача. Значимыми факторами при решении этой задачи являются [5]:

- параметры геометрической схемы ствола опоры;
- тип решетки ствола опоры;
- количество граней ствола опоры;
- способ закрепления ствола опоры;
- тип проката и марка стали конструктивных элементов опоры;
- тип и способ соединения конструктивных элементов опоры;
- капитальность, надежность и планируемый срок эксплуатации;
- место установки (климатический и температурный режим эксплуатации);
- нагрузки соответствующих ветровых районов, в случае гололедного района – рассчитанные нагрузки, соответствующие району обледенения, расчет на сейсмические воздействия);
- транспортируемость;

При замене отдельных МРБО в пределах ВЛ наиболее рациональным способом проектирования конкретных опор является модификация унифицированных конструкций (модификация отдельных элементов ствола опоры, изменение конструкции тросостойки, длины траверсы и т. д.).

Одним из вариантов разработки более экономичной конструкции является переход от одноболтового соединения элементов к двухболтовому, что позволяет снизить суммарную массу конструкции на 8...12 % [6]. Обоснованием такого перехода является тот факт, что от количества болтов зависит расчетная схема раскоса опоры: при постановке одного болта закрепление принимается шарнирным, при двух и более болтах вдоль оси усилия – жестким, а от типа узла зависит коэффициент приведенной длины m , который влияет на величину расчетной длины стержня. Величина коэффициента приведенной длины m определяется в соответствии с нормами [7].

При этом переход от одноболтового соединения к многоболтовому подразумевает увеличение количества деталей конструкции (метизы, прокладки и т. п.), и представляется не всегда возможным без применения фасонных элементов. Это приводит к увеличению стоимости изготовления и монтажа конкретного узлового соединения и общему снижению технологичности конструкции. Таким образом, чтобы выбрать рациональный тип болтового соединения необходимо от стоимости опоры в целом перейти к стоимости отдельных узловых соединений, что позволит наиболее полно оптимизировать конструкцию. Для этого систематизированы существующие типы узлов и выполнен их анализ.

С этой целью были выбраны несколько типов опор, отличающиеся конструктивными формами. Типы рассматриваемых опор: П 330-2, МС Е12, LE12, L30E12, L60E12, VS 32.2 (табл. 1). Ствол всех рассматриваемых опор – четырехгранный решетчатый, решетка выполнена из уголка, в основном равнополочного, по конструкции ствола опоры VS 32.2 – на оттяжках V-образная, остальные – свободностоящие башенного типа.

Промежуточная опора П 330-2 – типовая унифицированная 1974 г. Имеет перекрестную решетку, пояс выполнен из уголка 100×7, 140×10, 160×10, раскосы и диафрагмы – 50×5, 80×6. Реализованно одноболтовое соединение на болтах диаметром 16, 20 мм. Такая компоновка ствола по типу работы является фермой – работу ствола можно представить как работу отдельных граней.

Остальные опоры выполнены по индивидуальным проектам с учетом современных требований к конструктивным формам.

Опора типа МС Е12 – промежуточная. В тросостойке решетка треугольная, уголки мелкие: пояс – 80×8, раскосы – 50×5, реализовано одноболтовое соединение с болтами диаметром 16 мм. В верхней

Таблица 1 – Комплектация и тип решетки опор

Тип опоры	Уголки		Диаметр болтов, мм	Тип решетки
	в поясе	в раскосах		
П 330-2	100×7÷160×10	50×5÷80×6	16, 20	перекрестная
МС Е12	80×8÷200×12	50×5÷75×6	16, 20, 24	перекрестная, шпренгельная
LE12, L30E12, L60E12	80×8÷200×12	45×5÷90×9	14, 16	шпренгельная
VS 32.2	80×8	40×4÷63×5	12, 16	треугольная

части ствола решетка перекрестная, тип соединения – одноболтовой с болтами диаметром 20 мм. Уголки: пояс – 80×8, раскосы – 63×5–70×5. Решетка средней части ствола перекрестная, уголки более мощные: пояс – 140×9, раскосы – 70×5–75×6. Здесь уже преобладает многоболтовое соединение с подузловой фасонкой, применяются болты диаметром 24 мм. Решетка нижней части ствола шпренгельная, тип соединения – многоболтовой, диаметр болтов – 16 мм. Уголки такие же, как и в средней части ствола. Решетка в юбках шпренгельная, реализовано многоболтовое соединение, диаметр болта – 16 мм. Применены следующие уголки: пояс – 160×10–200×12, раскосы – 63×5–75×6.

Опоры типа L12 E12, L30 E12, L60 E12 очень схожи между собой, отличаются только габаритными размерами – шириной базы, высотой, размерами траверс; профилями уголков. Типы узлов практически одинаковые. Решетка в тросостойке треугольная, реализовано одноболтовое соединение с диаметром болтов 14 мм, пояс из уголков – 80×8, раскосы – 45×5–50×5. Решетка верхней секции опор – перекрестная. Преобладает многоболтовое соединение с фасонками диаметром 16 мм, пояс – 80×8–100×8, раскосы 50×5–63×5. В средней и нижней секции и в подставках – шпренгельная решетка. Уголки пояса – 125×9, 140×11, 160×11, 200×12, раскосы – 50×5–90×9. Преобладает многоболтовое соединение с диаметром болтов 16 мм (в расчетных узлах).

Опора на оттяжках VS 32.2 – промежуточная, решетка ствола – треугольная, использовались мелкие уголки (в поясе – 80×8, в раскосах – 40×4–63×5). Основным типом узловых соединений оказалось одноболтовое соединение, применялись болты диаметром 12, 16 мм.

При исследовании МРБО основное внимание обращено на конструкции узла по следующим параметрам в каждом типе узлового сопряжения:

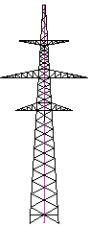
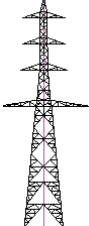
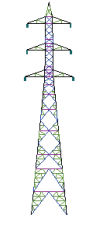
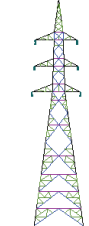
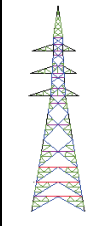
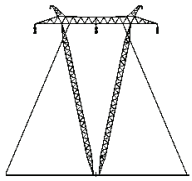
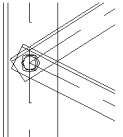
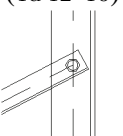
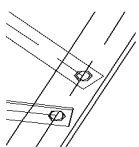
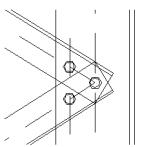
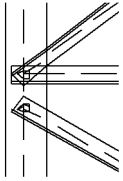
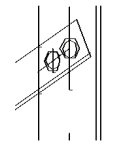
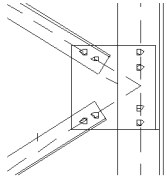
- количество болтов;
- марка, класс болтов;
- профиль пояса и прикрепляемых раскосов, их геометрические параметры;
- наличие фасонки и прокладки;
- наличие срезов, высечек, отгибов и т. д.

По результатам работы составлен альбом узлов. Все виды узловых сопряжений разделены на три группы: поясные (расчетные); нерасчетные; специальные. В альбоме приведены только первые две группы узлов. Они в свою очередь делятся на 52 типа в зависимости от параметров, перечисленных выше. К специальным относятся узлы для подвески проводов, крепления тросостоек, базы, оголовок опоры. Опоры, выполненные с учетом современных конструктивных форм, содержат до 5% специальных узлов, причем сварные соединения практически отсутствуют за счет применения специальных фундаментов, тогда как типовая опора содержит 10% специальных узлов и сварные соединения:

- 4,8 % для VS 32.2;
- 3 % для типа LE12, L30E12, L60E12;
- 5 % для типа МС Е12;
- 10 % для типа П 330-2 от общего количества узлов в опоре.

Наиболее распространенные типы узловых соединений приведены в табл. 2. Проанализировав применяемые типы узловых сопряжений в исследуемых опорах, можно сделать вывод, что одноболтовое соединение является самым распространенным, его количество в процентах на опору составляет 25...63 % для всех рассмотренных опор, что на порядок выше всех других типов узловых сопряжений. Однако если в типовой опоре П330-2 содержится 36 % одноболтовых соединений с диаметрами болтов 16...20 мм, то в опорах, LE12, L30E12, L60E12 – 22...25 % одноболтовых соединений с болтами диаметром 12...16 мм, это в основном крепление шпренгелей к поясам, раскосам, диафрагмам. Наибольший процент одноболтовых соединений оказался в опоре на оттяжках: в стойках – 49 %, в траверсе и тросостойках – 14 %, болты диаметром 12...16 мм. Это объясняется тем, что конструкция опоры легкая, уголки мелкие (40×4÷80×8).

Таблица 2 – Наиболее распространенные типы узлов сопряжений опор ЛЭП (в % на опору)

Тип опоры						
Тип узла	ПЗ30-2	МС	LE12	L30E12	L60E12	VS 32.2
(1d 12–20) 	36 %	28 %	25 %	22 %	22 %	стойки 49 % траверс тросост 14 %
(1d 12–16) 	6 %	26 %	22 %	20 %	20 %	7 %
(2d 14–16) 	7,8 %	5 %	7 %	11 %	15 %	1 %
(3d 14–16) 	---	---	3 %	2 %	4 %	3 %
(2d 14–16) 	3,3 %	4 %	5 %	3 %	2 %	0,2 %
(2d 14–16) 	---	---	4,5 %	8 %	4 %	0,5 %
(6d 16–24) 	---	1,8 %	1 %	1,2 %	1,3 %	0,2 %

В то же время широко применяется многоболтовое соединение – несколько болтов меньшего диаметра, хотя по расчету можно поставить один болт большего диаметра, особенно в индивидуальных проектах (2...4 %).

Таким образом, существует возможность перехода от одноболтового к многоболтовому соединению за счет уменьшения расчетной длины [1], но выбор между ними связан с конструктивной схемой опор. При треугольной и перекрестной решетке возможно применение как одноболтового, так и многоболтового соединения. При шпренгельной решетке выбор между одно- и многоболтовым соединением возможен только в ограниченном количестве узлов (крепление решеток к поясам, раскосов к диафрагме и т. п.), а крепление элементов шпренгелей к поясам, раскосам, диафрагмам возможно только одноболтовым соединением, так как усилия в элементах шпренгеля небольшие и соответственно сами уголки мелкие. А в целом, в типовых унифицированных проектах наших опор предпочтение отдается одноболтовому соединению вместе с тем, что процент содержания специальных узлов очень велик (10 %). В то время, как в мире идет тенденция к применению многоболтовых соединений и уменьшению количества специальных узлов.

СПИСОК ЛИТЕРАТОРЫ

1. Ляпунов, Е. В. Обобщение мировых тенденций развития техники и технологий электроэнергетики (по итогам 46-ой сессии СИГРЭ 2016 г.) / Е. В. Ляпунов. – Текст : непосредственный // Исследовательский комитет В2 «Воздушные линии». – 2017. – Москва : Федеральная сетевая компания. – С. 1–20.
2. Схема ЛЭП России – Карты. Схема развития ЭЭС России на 2017–2023 годы. Карта раскраска ЛЭП по напряжению согласно ГОСТ Р 56303-2014 : [сайт]. – Москва, 1999. – . – Обновляется в течение суток. – URL: <https://fhexosm.ru/power/> (дата обращения: 26.09.2022). – Текст : электронный.
3. Промышленные страницы Сибири : отраслевой журнал ; учредитель ООО "ИД ПромГрупп". – 2017. – Выпуск № 124 ноябрь. – 64 с. – Ежемесячно. – Текст : непосредственный.
4. Расследование и учет технологических нарушений в работе электростанций, сетей и энергосистем : инструкция. – Киев : Минэнерго Украины, 1994. – 50 с. – Текст : непосредственный.
5. ПУЭ 7. Правила устройства электроустановок : утверждены Приказом Минэнерго России от 08.07.2002 № 204 : дата введения 2003-01-01. – Москва : Минэнерго, 2003. – 115 с. – Текст : непосредственный.
6. Шевченко, А. В. Рациональные пространственные стержневые конструкции энергетического строительства в системе автоматизированного проектирования : специальность 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Шевченко Анатолий Владимирович. – Макеевка : ДонГАСА, 1997. – 300 с. – Текст : непосредственный.
7. СНИП II-23-81*. Стальные конструкции : издание официальное : утверждены постановлением Госстроя СССР от 14 августа 1981 г. № 144 : взамен СНИП II-V.3-72 ; СНИП II-И.9-62 ; СН 376-67 : дата введения 1982-01-01 / разработчики ЦНИИСК им. Кучеренко с участием ЦНИИпроектстальконструкции Госстроя СССР, МИСИ им. В. В. Куйбышева Минвуза СССР, института «Энергосетьпроект». – Москва : ЦИТП Госстроя СССР, 1990. – 96 с. – Текст : непосредственный.

Получена 17.11.2022

Принята 25.11.2022

В. М. ВАСИЛЕВ ^а, Л. О. ГАВРИЛОВА ^б, Р. І. ІГНАТЕНКО ^а
АНАЛІЗ ВУЗЛОВИХ З'ЄДНАНЬ МЕТАЛЕВИХ ГРАТЧАСТИХ БАШТОВИХ
ОПОР ЛЕП

^а ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»,

^б ООО «ГПК Інжиніринг»

Анотація. У цій статті систематизовано та досліджено можливі варіанти розробки найбільш економічної конструкції металевих гратчастих баштових опор (МГБО) ЛЕП у місці з'єднання. Більшість експлуатованих ПЛ значно перевищили термін служби, запланований при їх проектуванні та зведенні. Тому актуальною проблемою підтримки безаварійної роботи є ремонт та заміна окремих МРБО в межах ПЛ. У статті визначено значущі фактори проектування доставки, складання, монтажу та експлуатаційної роботи конструкцій МРБО з урахуванням конструктивних обмежень та вимог технології виготовлення. Здійснено систематизацію, дослідження та аналіз вузлів з'єднання опор з урахуванням значущих факторів, особливо типу болтових з'єднань. Розглянуто варіант розробки більш економічної конструкції з переходом від одноболтового з'єднання елементів до двоболтового, що дозволяє знизити сумарну масу конструкції на 8...12 %. За результатами роботи складено альбом вузлів. **Ключові слова:** повітряна лінія електропередавання (ПЛ); металева опора; елементи ствола опори, вузли з'єднання опор.

VOLODYMYR VASYLEV ^a, LUDMILA GAVRILOVA ^b, ROMAN IGNATENKO ^a
ANALYSIS OF NODAL CONNECTIONS OF METAL LATTICE TOWER
SUPPORTS OF POWER TRANSMISSION LINES

^a Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, ^b LLC «GPC Engineering»

Abstract. In this article, possible options for developing the most economical design of Metal Lattice Tower Supports (MRBO) of power transmission lines at the junction are systematized and investigated. Most of the operated overhead lines have significantly exceeded the service life planned during their design and construction. Therefore, the urgent problem of maintaining trouble-free operation is the repair and replacement of individual MRBOs within the overhead line. The article defines the significant design factors for the delivery, assembly, installation and operation of MRBO structures, taking into account design limitations and manufacturing technology requirements. The systematization, research and analysis of the junctions of the supports were made, taking into account significant factors, especially the type of bolted connections. The option of developing a more economical design with the transition from a single-bolt connection of elements to a two-bolt connection is considered, which makes it possible to reduce the total mass of the structure by 8...12 %. Based on the results of the work, an album of nodes was compiled.

Key words: overhead power line (OPL); metal support; support shaft elements; support junctions.

Васильев Владимир Николаевич – кандидат технических наук; профессор кафедры металлических конструкций и сооружений; начальник Лаборатории испытаний строительных конструкций и сооружений ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: экспериментально-теоретическое исследование работы опор линий электропередачи; регулирование и учет внутреннего напряженного состояния горячекатаного проката в строительных конструкциях.

Гаврилова Людмила Александровна – технический директор ООО «ГПК ИНЖИНИРИНГ». Научные интересы: экспериментально-теоретическое исследование работы опор линий электропередачи, строительных конструкций и сооружений; технология изготовления строительных конструкций.

Игнатенко Роман Иванович – ассистент кафедры технологии и организации строительства ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: технология монтажа металлических решетчатых башенных опор ЛЭП, экспериментально-теоретическое исследование работ опор линий электропередач.

Василев Володимир Миколайович – кандидат технічних наук; професор кафедри металевих конструкцій та споруд; начальник Лабораторії випробувань будівельних конструкцій і споруд ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: експериментально-теоретичне дослідження роботи опор ліній електропередавання; регулювання і врахування внутрішнього напруженого стану горячекатаного прокату в будівельних конструкціях.

Гаврілова Людмила Олександрівна – технічний директор ТОВ «ГПК ІНЖІНІРІНГ». Наукові інтереси: експериментально-теоретичне дослідження роботи опор ліній електропередачі, будівельних конструкцій і споруд; технологія виготовлення будівельних конструкцій.

Ігнатенко Роман Іванович – асистент кафедри технології та організації будівництва ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: технологія монтажу металевих ґратчастих баштових опор ЛЕП, експериментально-теоретичне дослідження робіт опор ліній електропередавання.

Vasylev Volodymyr – Ph. D. (Eng.), Associate Professor; Metal Structures and Constructions Department, Head of the Laboratory of Testing Building Structures and Buildings, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: experimental and theoretical investigation of power transmission tower operation, control and record of the inner stressed state of the hot rolled metal in building structures.

Gavrilova Ludmila – technical Director of LLC «GPC ENGINEERING». Scientific interests: experimental and theoretical study of the operation of power transmission line supports, building structures and structures; technology for the manufacture of building structures.

Ignatenko Roman – assistant, Technology and Management in Construction Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: technology of installation of metal lattice towers for power transmission lines, experimental and theoretical research of the work of power transmission line supports.