

УДК 621.315.1

**Звягинцев Александр Васильевич, Савотин Олег Александрович,  
Павлов Артём Иванович**

## **УЧЁТ СОВРЕМЕННЫХ ТРЕБОВАНИЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ СТАЛЬНЫХ РЕШЁТЧАТЫХ ОПОР НОВЕЙШЕЙ УНИФИКАЦИИ**

*В настоящее время на ВЛ применяются унифицированные стальные решетчатые опоры разработанные в 1960–1980-е годы. В 2005 году проекты на данные опоры были переведены в разряд «Материалов для проектирования», т. к. не соответствуют требованиям современных нормативных документов. А в связи с введением в действие в 2003 году 7-й редакции ПУЭ и изменением ряда других нормативных документов, применение этих опор не рационально.*

*В целях новейшей унификации в 2016–2017 гг. выполняется НИОКР «Разработка унифицированных стальных решетчатых опор ВЛ 220–500 кВ и железобетонных фундаментов опор ВЛ 220–500 кВ по ПУЭ-7». При разработке унифицированных решетчатых опор учитываются экономические требования, требования нормативных документов, требования к конструкциям; к изготовлению и монтажу. Этапы новейшей унификации: оптимизация – поиск наилучших решений; адаптация – использование существующих решений; соответствие действующей научно-технической документации; расширение области применения.*

*Экономическая эффективность разрабатываемых опор достигается путем проведения оптимизации конструкций опор. Критерием оптимальности является минимальная стоимость владения ВЛ.*

**Ключевые слова:** стальная решетчатая опора, воздушная линия электропередачи, оптимизация, унификация, типовой проект.

### **Aleksandr Zvyaginцев, Oleg Savotin, Artem Pavlov IN VIEW OF MODERN REQUIREMENTS IN THE DEVELOPMENT OF STEEL LATTICE TOWERS FOR THE LATEST UNIFICATION**

*Currently, unified steel lattice towers, which was developed in 1960–1980th in USSR, are used for the overhead power lines. The standard projects of the lattice towers were qualified to the «Materials for Designing» category in 2005 because they did not comply with modern regulations. As soon as Electrical Installations Code (EIC) were published in its 7th edition in 2003, the use of these towers is not effective nowadays.*

*To apply towers on modern overhead lines (which will comply with existing norms) in the 2016 PJSC «FGC UES» started research «Development of unified steel lattice towers of 220–500 kV and the reinforced concrete raft of supports for overhead lines 220–500 kV for the EIC-7». The principal requirements of the R&D are regulatory requirements, economic requirements, construction requirements, requirements of manufacturing and installation. Development is carried out in the following order: optimization – search for the best solutions; adaptation – the use of existing solutions; compliance with existing scientific and technical documentation; extension of the application.*

*The economic efficiency of the developed towers is achieved through optimization of tower constructions. The objective function is the lowest total cost of ownership of overhead lines.*

**Key words:** steel lattice tower, overhead power line, optimization, unification, standard projects.

В технике унификация – «приведение изделий к единообразию на основе установления рационального числа их разновидностей» [1].

Суть принципа унификации конструкций изделий (опор ВЛ) заключается в ограничении многообразия возможных частных (индивидуальных) решений на всех этапах проектно-конструкторской деятельности рамками общих свойств и признаков, приводящих изделия (опоры) к единой системе типовых конструкций.

Унификация позволяет повысить серийность операций и выпуска изделий и, как следствие, удешевить производство, сократить время на его подготовку. С другой стороны, унификация зачастую ведет к увеличению габаритов, массы, снижению эффективности и т. п. вследствие не всегда оптимальных значений используемых параметров.

Противоположностью унификации является разработка индивидуальных конструкций, в том числе опор ВЛ. Опоры индивидуальной разработки максимально учитывают параметры и особенности объекта строительства, обеспечивают лучшие технико-экономические показатели. Однако на разработку проекта строительства ВЛ с данными опорами требуется значительно больше времени, в том числе с учетом прохождения регламентированной процедуры проверки качества и соответствия техническим требованиям. Поэтому для массового строительства применение унифицированных конструкций более целесообразно.

В настоящее время на ВЛ применяются унифицированные стальные решетчатые опоры, разработанные в 1960–1980-е годы. При этом эти опоры делятся на несколько поколений унификации, отвечающих нормативным, технологическим, эксплуатационным требованиям соответствующих лет.

В 2005 году существующие типовые проекты были переведены в разряд «Материалов для проектирования», т. к. не соответствуют требованиям современных нормативных документов. А в связи с введением в действие в 2003 году 7-й редакции ПУЭ и изменением ряда других нормативных документов, применение этих опор стало нерациональным и зачастую невозможным без нарушения требований действующей нормативной документации.

Использование существующих унифицированных опор возможно только при ограничении области применения либо при внесении значительных изменений в конструкцию: увеличении расстояний между траверсами, вылетов траверс, высоты тросостойки, усилении элементов и т. п.

Для приведения унифицированных опор в соответствие с требованиями действующих нормативных документов, а также для повышения эффективности применения необходимо выполнение их модернизации.

Критериями модернизации являются:

- 1) приведение в соответствие конструкций опор требованиям действующей НТД;
- 2) обеспечение экономической эффективности – снижение затрат на изготовление, строительство и эксплуатацию конструкций опор.

Для применения на ВЛ опор, соответствующих требованиям действующих норм, в 2016–2017 гг. выполняется НИОКР «Разработка унифицированных стальных решетчатых опор ВЛ 220-500 кВ и железобетонных фундаментов опор ВЛ 220-500 кВ по ПУЭ-7».

Календарным графиком работ на 2016 г. запланирована разработка четырех промежуточных и трех анкерно-угловых опор ВЛ 220 кВ, изготовление и испытания опытных образцов.

*Исходные данные и требования, учитываемые при унификации.* Разработка модернизированных опор выполняется на базе унифицированных по типовым проектам 3.407-99 и 3.407-100 на следующие климатические условия:

- а) промежуточные опоры:

*одноцепные:*

- П220-3: ветровой район – II–III;
- ПС220-5: ветровой район – IV–V.

*двухцепные:*

- П220-2: ветровой район – II–III;
- ПС220-6: ветровой район – IV–V.

- б) анкерно-угловые опоры:

*одноцепные и двухцепные:*

- У220-1, У220-3, У220-2: ветровой район – II–V;

Гололедный район для всех типов опор – I–IV.

Опоры предусматривают подвеску проводов по ГОСТ 839-80 марки АС 300/39, 400/51, а также проводов современных типов.

При разработке унифицированных решетчатых опор учитываются следующие основные требования.

### **1. Требования нормативных документов.**

Основными нормативными документами предъявляющими требования к разработке опор ВЛ являются:

- правила устройства электроустановок (ПУЭ);
- своды правил: «Стальные конструкции», «Нагрузки и воздействия», «Защита строительных конструкций от коррозии», «Строительная климатология».

В новых редакциях нормативных документов изменились требования к нагрузкам и воздействиям, коэффициентам надежности, условий работы и т. п., материалам, соединениям, методикам расчета, защите конструкций от воздействия окружающей среды и другие.

### **2. Экономические требования.**

Конструкции опор проектируются оптимально с точки зрения минимизации стоимости строительства ВЛ в целом.

### **3. Требования к конструкциям.**

При разработке конструкций опор рассматривается применение различных марок конструкционных сталей. Опоры удовлетворяют требованиям к конструкциям и изделиям, подлежащим цинкованию. Конструкции опор предусматривают возможность подвески оптических кабелей – встроенных в грозозащитный трос, а также самонесущих неметаллических. Конструкции опор предусматривают модификации тросостоек для возможности выполнения плавки гололеда на грозотросах.

### **4. Требования к изготовлению.**

Конструктивное исполнение опор обеспечивает технологичность изготовления и учитывает следующие основные требования:

- минимизация количества элементов и соединений в конструкциях опоры;
- оптимальный раскрой фасонного проката (поясных уголков);
- минимальное количество фасонки в узловых соединениях;
- образование отверстий в элементах опоры пробивкой, для возможности изготовления на автоматизированных линиях;
- минимизация скосов, криволинейных резов;
- унификация сортамента основных элементов;
- минимизация количества сварных соединений.

### **5. Требования к монтажу.**

Конструкции опор разрабатываются состоящими по возможности из минимального числа элементов, позволяющих сократить временные затраты на сборку опоры. Конструкции опор предусматривают возможность их установки цельной конструкцией при помощи строительной техники общего назначения, а также методом наращивания.

Основные этапы унификации. Для учета современных требований при разработке стальных решетчатых опор их унификация выполняется по следующим основным этапам:

- а) оптимизация – поиск наилучших решений;
- б) адаптация – использование существующих решений;
- в) соответствие действующей научно-технической документации (НТД);
- г) расширение области применения.

*Оптимизация опор.* Экономическая эффективность разрабатываемых опор достигается путем проведения оптимизации конструкций опор. Критерием оптимальности является минимальная стоимость владения ВЛ.

Основными параметрами, влияющими на стоимость владения ВЛ являются:

- стоимость опор и фундаментов (материалы, строительно-монтажные работы, изоляторы и арматура);
- стоимость провода и грозотросы (оборудование, строительно-монтажные работы);

- стоимость подготовки просеки (состоит из вырубке просеки и устройства лежневых дорог);
- стоимость затрат на эксплуатационные расходы (определяется от капитальных затрат в зависимости от величины пролета);
- стоимость постоянного отвода;
- стоимость потерь на передачу электроэнергии.

Таким образом, целевая функция оптимизации промежуточных опор в общем виде описывается как:

$$C_{ВЛ} = f(C_{ОФ} + C_{ПТ} + C_{ПП} + C_{Э} + C_{ПО} + C_{ПЭ})$$

На основе методики и алгоритма оптимизации разработан специальный программный комплекс реализующий расчет и выбор оптимальных схем опор.

Оптимизация опор выполняется с учетом следующих конструктивных параметров:

- высота до нижней траверсы (при этом связанным параметром является: компоновка верха опоры (расстояния между траверсами, вылеты траверс), высота тросостойки);
- ширина базы опоры, форма базы: квадратная, прямоугольная (связанный параметр: нагрузки на фундамент и соответствующий им тип (размеры) фундамента);
- ширина верхней части ствола;
- форма ствола (с параллельными или наклонными поясами верхней секции) и соответствующая ширина средней части ствола;
- количество панелей решетки (а также тип решетки ствола).

Результатом оптимизации является схема опоры с определенными основными конструктивными параметрами и назначенными сечениями элементов.

На рис. 1–3 представлены схемы разработанных модернизированных опор ВЛ 220 кВ.

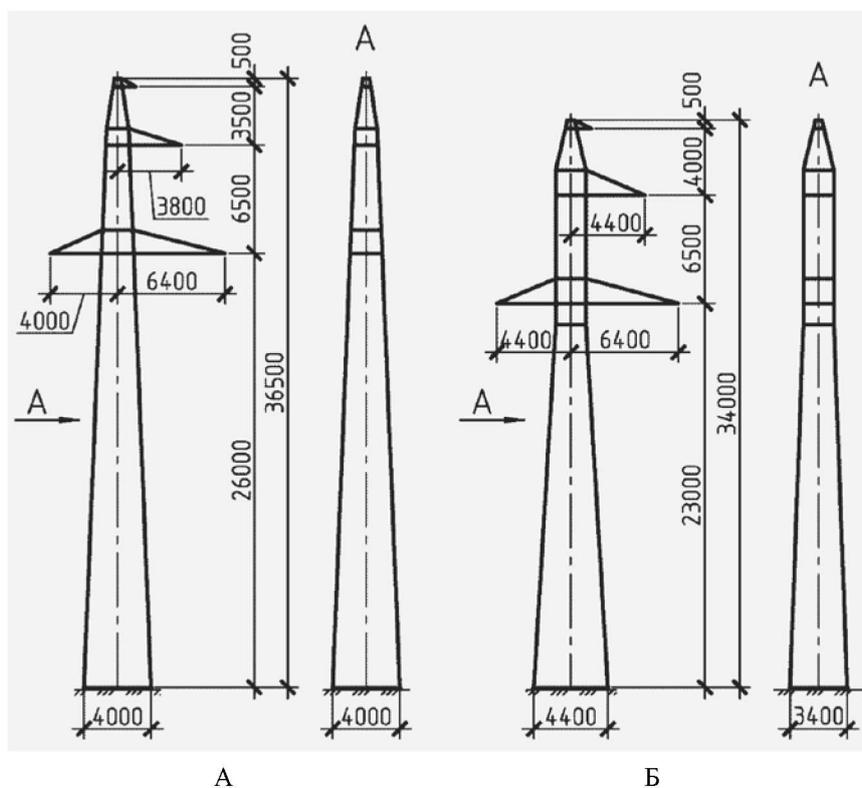


Рис. 1. Схемы промежуточных одноцепных модернизированных опор П220-3м (А) и ПС220-5м (Б)

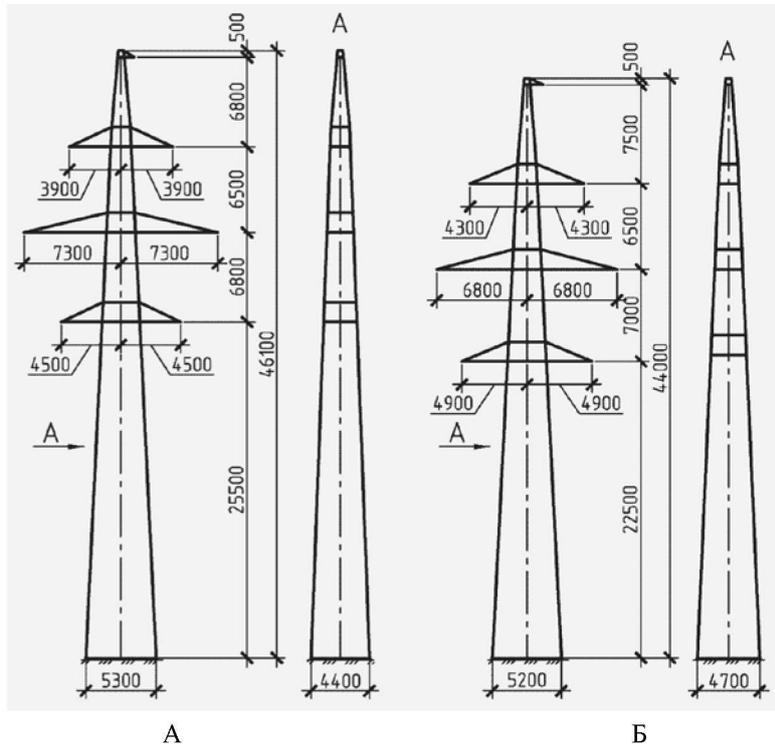


Рис. 2. Схемы промежуточных двухцепных модернизированных опор П220-2м (А) и ПС220-6м (Б)

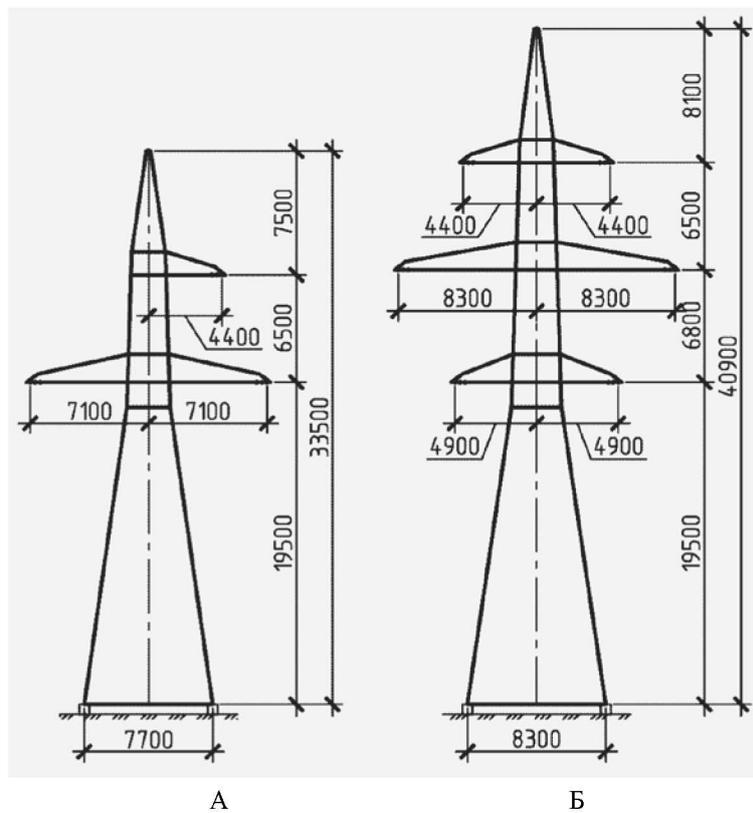


Рис. 3. Схемы анкерно-угловых модернизированных опор У220-1м(+9) (А) и У220-2м(+9) (Б)

Технико-экономическое сравнение унифицированных и модернизированных опор выполняется на примере их использования в равных условиях. Для сравнения принимаются одинаковые климатические условия, марка провода, грозотросы и т. п. Для промежуточных опор оценивается стоимость владения участком ВЛ длиной 5 км, а для анкерно-угловых опор – стоимость одной опоры (полная стоимость: материалы по опоре и фундаментам, СМР).

Количество промежуточных опор на участок ВЛ определяется по минимальным расчетным пролетам. Расчетные пролеты для существующих унифицированных промежуточных опор определяются следующим образом:

- *габаритный пролет*: в соответствии со значениями допускаемых напряжений в проводе и грозотросе согласно данным типового проекта выполняется систематический расчет провода. Климатические параметры принимаются соответствующими модернизированным опорам. Пролет определяется по условию обеспечения габарита до земли, условию обеспечения допустимого расстояния между проводами, а также между проводами и грозотросом (по схлестыванию и пляске);
- *ветровой и весовой пролеты*: исходя из значений горизонтальной и вертикальной нагрузок (на провода и тросы, а также на конструкцию опоры), указанных в расчетных листах типовых проектов, выполняется пересчет пролетов на климатические условия соответствующие модернизированным опорам.

Основные технико-экономические показатели унифицированных и модернизированных опор представлены в таблицах 1–3.

Таблица 1

Тип опоры	П220-3	П220-3м	ПС220-5	ПС220-5м
Марка провода	АС 400/51	АС 400/51	АС 400/51	АС 400/51
Высота до нижней траверсы [м]	25,5	26,0	22,5	23,0
Пролёт [м]	365	495	290	345
Стоимость 1 опоры [млн руб.]:	0,100	0,104	0,114	0,113
Стоимость ВЛ [млн руб.]:	8,130	7,626	8,962	8,459

Таблица 2

Тип опоры	П220-2	П220-2м	ПС220-6	ПС220-6м
Марка провода	АС 400/51	АС 400/51	АС 400/51	АС 400/51
Высота до нижней траверсы [м]	22,5	25,5	22,5	22,5
Пролёт [м]	320	460	230	310
Стоимость 1 опоры [млн руб.]:	0,137	0,165	0,172	0,183
Стоимость ВЛ [млн руб. ]:	12,950	12,365	15,106	13,962

Таблица 3

Тип опоры	У220-1 (+9)	У220-1м (+9)	У220-2 (+9)	У220-2м (+9)
Марка провода	АС 400/51	АС 400/51	АС 400/51	АС 400/51
Высота до нижней траверсы [м]	19,5	19,5	19,5	19,5
Стоимость опоры: [млн руб.]	0,287	0,268	0,520	0,509

Результаты технико-экономического сравнения показывают эффективность применения модернизированных промежуточных опор с проводом марки АС 400/51 по отношению к унифицированным опорам.

Так, общая стоимость владения участком ВЛ снижается в среднем на  $5 \div 10$  %, при этом металлоемкость промежуточных модернизированных опор на участок ВЛ ниже в среднем на  $10 \div 25$  % по сравнению с унифицированными опорами.

*Расширение области применения опор.* Существующие конструкции унифицированных опор разработаны таким образом, что являются наиболее оптимальными для определенных базовых, довольно ограниченных внешних условий (климат, марка провода и т. п.). Для условий, отличных от базовых, конструкции опор являются менее эффективными.

Разработка модернизированных стальных решетчатых опор (опор новейшей унификации) выполняется с расширенной областью применения.

Расширение области применения дает гибкость использования унифицированных опор, позволяет приблизиться к конструкциям индивидуальной разработки, а значит, в большей степени учесть индивидуальные особенности объекта строительства.

Расширение области применения реализуется следующим образом. Оптимизация опор выполняется на базовые внешние условия. На основе базовой оптимизированной схемы опоры разрабатываются модификации учитывающие изменения различных внешних условий:

- климатических условий: районов по ветру / гололеду;
- различных марок проводов / грозотросов, в том числе современных типов;
- подвески ОКСН и др.

При этом для эффективного использования габаритного и расчетных пролетов (сохранения их номинальных значений) модификации отличаются от базовой опоры только соответствующим соотношением элементов. Общая геометрическая схема и конструктивные решения основных узлов сохраняются. Индивидуальные условия применения, такие как: необходимость в повышенных опорах, подвеска двух грозотросов, плавка гололеда, – решаются применением соответствующих подставок и типов тросостоек.

Возможность применения модификаций опор обеспечивается типовыми проектами наряду с базовой унифицированной опорой.

Основной инновационной составляющей разрабатываемых модернизированных опор является то, что в пределах каждой модификации предусмотрена возможность применения наряду с типовым проводом марки АС по ГОСТ 839-80, проводов современных конструкций соответствующей площади сечения алюминиевой части. Так, например, вместо проводов АС 400/51 могут быть применены провода АСк2у 400/51, АСВП 403/61, а также другие типы.

При этом современные типы проводов применяются без ограничения максимально допустимых напряжений, т.е. с максимально возможными габаритными и, соответственно, ветровыми и весовыми пролетами.

Результаты сравнения вариантов применения модернизированных опор с современными типами проводов представлены в таблице 4.

Таблица 4

Тип опоры	П220-3	П220-3м	П220-3м	П220-3м
Марка провода	АС 400/51	АС 400/51	АСк2у 400/51	АСВП 403/61
Высота до нижней траверсы [м]	25,5	26,0	26,0	26,0
Пролёт [м]	365	495	560	575
Стоимость 1 опоры [млн руб.]:	0,100	0,104	0,104	0,104
Стоимость ВЛ [млн руб.]:	8,130	7,626	7,435	7,381
Снижение стоимости ВЛ [%]:	0	-7 %	-9 %	-10 %

Применение проводов современных конструкций увеличивает разницу в стоимости владения ВЛ с применением модернизированных опор, повышая их эффективность.

Таким образом, результаты выполненной работы в части опор ВЛ 220 кВ показывают эффективность модернизированных решетчатых опор в различных областях применения. Разрабатываемые модернизированные опоры в значительной степени отличаются от своих прототипов по области применения, конструктивному исполнению, технико-экономическим показателям. Поэтому после прохождения всех регламентированных процедур модернизированные опоры следует считать опорами новейшей унификации и использовать в проектировании при новом строительстве, а также переустройстве и техническом перевооружении существующих ВЛ.

#### *Литература*

1. ГОСТ 23945.0-80 Унификация изделий. Основные положения (с Изменением № 1).
2. СП 16.13330.2011 Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81;
3. Правила устройства электроустановок, ПУЭ. 7-е изд. Раздел 2. М.: Изд. НЦ ЭНАС, 2003;
4. ГОСТ 25100-2011 Грунты. Классификация.