

ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕШЕТЧАТЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Е. В. Горохов, В. Н. Васылев, С. Н. Бакаев, А. В. Танасогло

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка

Аннотация. В статье представлена новая концепция проектирования электрических сетей, с помощью которой разработаны новые унифицированные металлические опоры, экономичные и надежные, для энергетики. Впервые создан метод оптимального проектирования воздушных линий (ВЛ) электропередачи как единой конструктивной системы с учетом рельефа местности, атмосферно-климатических условий и степени загрязненности окружающей среды, требований экономичности, технологичности и эксплуатационных затрат. Уделено внимание изменениям, внесенным в ограничения и условия, которым удовлетворяет вектор варьируемых параметров для отыскания геометрических размеров решетчатых конструкций минимальной массы. Оптимальное проектирование, контрольная компьютерная сборка и применение прогрессивных технологий позволяют сократить сроки строительства, снизить затраты на эксплуатацию и увеличить срок службы электрических сетей.

Ключевые слова: оптимальное проектирование, программный комплекс, воздушная линия электропередачи, конструктивная схема, решетчатая опора, целевая функция массы, компьютерная сборка, алгоритм.



Горохов
Евгений Васильевич



Васылев
Владимир Николаевич



Бакаев
Сергей Николаевич



Танасогло
Антон Владимирович

ВВЕДЕНИЕ

При строительстве воздушных линий в Российской Федерации, Украине, Казахстане, Республике Беларусь традиционно применяются унифицированные конструкции опор, разработанные по нормативам бывшего СССР [1-4]. Рассматривая существующую унификацию с позиции сегодняшних рыночных отношений, можно увидеть, что такие опоры не могут конкурировать с аналогичными зарубежными. В сложившейся ситуации возникла необходимость разработки новых унифицированных конструктивных форм опор ВЛ, которая вызвана несколькими причинами. Отметим основные из них: ужесточились международные нормы для определения нагрузок от климатических воздействий с целью повышения надежности ВЛ; необходим учет действительной работы пространственной конструкции опоры в составе ВЛ как единой сети с учетом поддерживающего влияния проводов и тросов [5-7].

Значительные резервы в решении данной проблемы заложены в совершенствовании строительных конструкций ВЛ при абсолютном сохранении их эксплуатационных качеств [8-11]. Поэтому вопрос поиска оптимального конструктивного решения при одновременном соблюдении требований методики расчета и конструирования, является весьма актуальной задачей, поскольку направлен на сохранение конкурентоспособности электрических сетей на мировом рынке за счет экономии металла при применении нетиповых опор.

Анализ исследований относительно оптимального проектирования строительных конструкций дает возможность сформулировать задачу исследований, которая диктуется современным состоянием в области оптимизации конструкций и запросами практики.

Проектирование конструкций высоковольтных линий электропередачи определяется большим количеством разнообразных параметров и требований: длиной линии, передаваемым напряжением, рельефом местности, районом строительства, электрическими габаритами, стоимостью отчуждаемой земли, материалом конструктивных элементов, требованиями унификации, возможностями завода производителя, сортаментом [12-16].

Совершенствование методик расчета и оптимизации опор ВЛ возможно путем уточнения усилий и перемещений элементов конструкции при натурных и лабораторных испытаниях. Поэтому необходимо проводить масштабные статические и динамические испытания на специализированных испытательных полигонах электросетевых конструкций для исследования действительной работы решетчатых опор башенного типа.

ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ РЕШЕТЧАТЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В работе [5] разработана оптимальная одностадийная автоматизированная система проектирования и изготовления электросетевых конструкций с учетом конструктивных и технологических требований заводов-производителей, которая сократила время на изготовление конструкций, а главное, повысила качество продукции. Система включает программный комплекс прочностных и оптимизационных расчетов проводов, тросов и металлоконструкций опор; моделирование в натуральный размер; компьютерную контрольную сборку конструкций.

На основе предложенного числового метода оптимизации часть параметров задана однозначно: геометрические размеры, назначаемые из условия электрических габаритов между проводами, тросами и конструкцией, а также нагрузка (величина скоростного напора ветра, толщина гололедных отложений на проводах, натяжение провода при обрыве). Варьируются параметры, от которых зависит эффективность металлических решетчатых опор: конструктивная форма опоры (портальная, башенная, опора на оттяжках), пролет и связанная с ним высота опоры, габаритные размеры и форма отдельных конструктивных элементов (ствола, траверс, тросостойки), типы решеток и типы соединения элементов в узлах, длины секций, сортамент металлопроката и материал конструкции.

В то же время известная программа расчета опор ВЛ «TOWER», разработанная в США и рекомендованная международной электротехнической комиссией, имеет целый ряд недостатков в сравнении с предложенным авторами программным комплексом, а именно: ветровая весовая нагрузка на опоры учитывается приблизительно, расчет проводов и опор осуществляется раздельно, вместо оптимизации осуществляется упрощенный перебор геометрических параметров, нет оптимизации ВЛ по профилю трассы.

Используя созданный программный комплекс [17-19], авторами разработаны новые эффективные опоры: узкобазые одностоечные, которые хорошо зарекомендовали себя в Крыму со сложными горными условиями; порталные опоры с гибкими связями, которые имеют затраты стали на 30 % ниже зарубежных аналогов.

В основу задачи поиска оптимальных параметров конструкций опор ВЛ положены числовые методы минимизации нелинейных целевых функций. Такие исследовательские приемы с использованием аппарата нелинейного программирования хотя и не дают четкого математического решения задачи, но позволяют учесть то необходимое количество факторов, которое способно приблизить задачу к практическим запросам и дать ощутимый экономический эффект.

С учетом изложенного, задача оптимального проектирования опор ВЛ формулируется таким образом – отыскать геометрические параметры башни с варьированием координат системы и топологии при заданных сечениях с минимизацией массы или стоимости при выполнении нормативных требований и конструктивных ограничений. Параметры варьирования X_j являются как непрерывно переменными, так и дискретными.

В результате экспертной оценки возможных к применению методов для решения задачи оптимизации конструкций ВЛ наиболее эффективными оказались: метод улучшенного поиска, метод деформированного многогранника Нелдера-Мида и методы прямого поиска Хука-Дживса и Девис-Свенна-Кэмпби [20-22]. Последовательное применение этих методов дает возможность значительно приблизиться к оптимальному варианту.

Авторами предложен метод поиска, который решает на начальном этапе выбрать направление спуска при определении оптимальных геометрических параметров. Результаты проведенных числовых исследований показали, что направление спуска определяется уже на первых итерациях. Если направление поиска оказывалось удачным, то формировался многогранник с «улучшенной» вершиной, и поиск продолжался до тех пор, пока шаг переноса не оказывался меньше заведомо заданной точности или процесс поиска завершался по количеству итераций. Оптимальное значение целевой функции данного метода было исходным значением при переходе к следующему методу оптимизации.

Предложенный метод начальной оптимизации является очень эффективным и позволяет осуществлять выход из «оврагов» для существенно нелинейных дискретных задач (рис. 1), в отличие от других методов (метод деформированного многогранника, прямой поиск по Хуку-Дживсу и др.).

Как критерий оптимальности проекта целевая функция принята в виде массы или стоимости конструкции опоры. Целевая функция – это сложная нелинейная функция параметров управления. Дискретность и важная нелинейность целевой функции ставит вопросы о создании алгоритма, который бы обеспечивал сходимость с проектом минимальной массы.

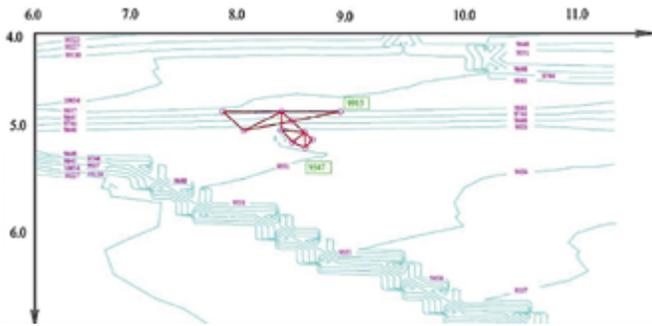


Рис. 1. Эффективность поиска методом координатного спуска.

При решении задачи оптимизации конструкции опоры ВЛ используются исходные данные, учитываются конструктивные и другие требования, выполняются статические и оптимизационные расчеты [5, 23].

Задача оптимизации сводится к нахождению вектора варьируемых параметров (1), который минимизирует целевую функцию и удовлетворяет ограничениям (2)-(4) и условиям (5), (6). Система ограничений формируется автоматически в виде проверок целевой функции, выражение которой является сложной нелинейной задачей, т. к. велико число варьируемых параметров [17, 24].

$$Z = f (H, L, b, Q, l_t, R_y, K_b, n_p)$$

В формуле (1) величины H, L, b, Q – заданные параметры, где H – высота опоры, b – база, L – пролет, Q – вектор внешней нагрузки; величины l_t, R_y, K_b, n_p – варьируемые параметры геометрической схемы, где l_t – длина панели, K_b – количество болтов, n_p – тип решетки опоры.

Выпишем основные ограничения, которым удовлетворяет вектор варьируемых параметров (1):

- несущая способность сжатых и растянутых элементов соответственно:

$$N_i \leq A_i \cdot R_{yi} \cdot \phi_i \quad \text{и} \quad N_i \leq A_i \cdot R_{yi}$$

где N_i – продольная сила в i -том элементе; R_{yi}, A_i, ϕ_i – соответственно расчётное сопротивление, площадь поперечного сечения и коэффициент продольного изгиба i -го элемента;

- минимальная площадь элемента:

$$A_i \geq [A_i],$$

где $[A_i]$ – минимально допустимая площадь i -того элемента по предельной гибкости или по конструктивным требованиям;

- значение неизвестных:

$$J_i \geq X_i \geq j_i,$$

где J_i и j_i – верхний и нижний пределы изменения варьируемых параметров.

Основные условия, которым удовлетворяет вектор варьируемых параметров (1):

- условие равновесия:

$$k(x) \cdot B - P(x) = 0,$$

где $k(x)$ – матрица жесткости системы; B – вектор

узловых перемещений; $P(x)$ – вектор внешних нагрузок;

- условие совместности деформаций:

$$\Delta L_{Ni} (N_i, A_i, l_i) = \Delta L_i (\Delta x, \Delta y, \Delta z),$$

где ΔL_{Ni} и ΔL_i – деформация соответственно i -того и $i+1$ элемента.

Геометрическая схема опоры ВЛ задается с учетом ограничений (2)-(4) на пределы изменения переменных. Данные ограничения направлены на то, чтобы сохранить определенную форму системы и поставить в соответствие варьируемые параметры требованиям проектирования [25-27].

Алгоритм оптимального проектирования опор ВЛ реализован в программном комплексе по расчёту и конструированию конструкций линий электропередачи «MISI1», разработанному в Донбасской национальной академии строительства и архитектуры (рис. 2).

Решение задачи оптимизации выполнено численными методами нелинейного программирования, которые не используют производные. В основе поиска лежит идея использования предыдущей информации для построения улучшенных решений с помощью итерационных процедур. Проведенные исследования дали возможность предложить следующую методику применения разных математических методов и их последовательность. На первом этапе определяется оптимальный тип решетки при заданных геометрических размерах (для свободностоящих опор) с использованием разработанного комбинаторного алгоритма. Значение целевой функции при оптимальном типе решетки становится исходным для следующих итерационных расчетов. Потом задается начальный многогранник, который имеет форму регулярного симплекса. Определяется направление спуска. Для новых значений параметров, которые варьируются, подбирается оптимальный тип решетки комбинаторным алгоритмом (KOMBI) с вычислением целевой функции.

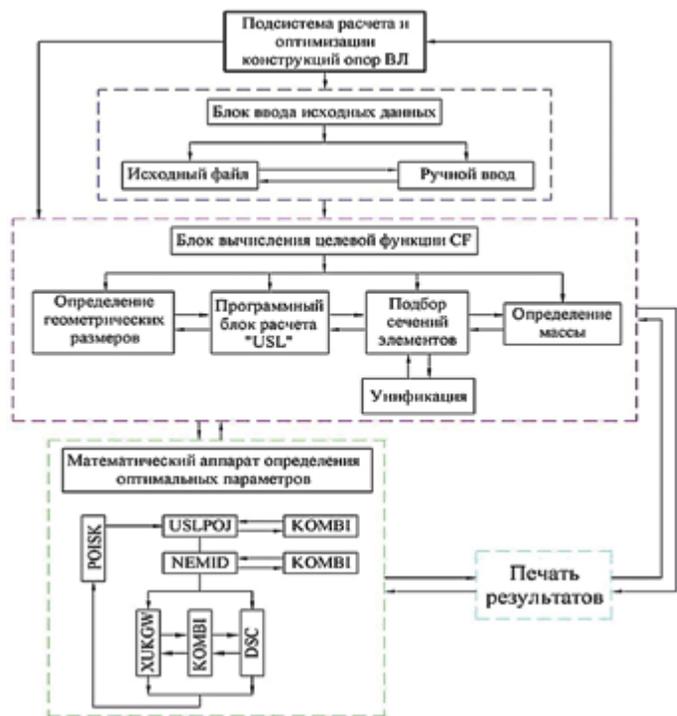


Рис. 2. Блок-схема оптимизационного расчета стальной опоры ВЛ.

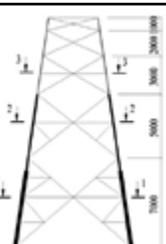
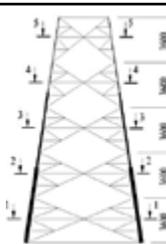
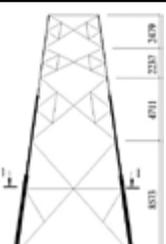
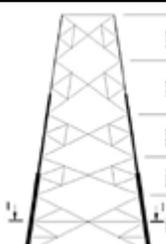
В дальнейшем для определения оптимума используется многогранник, в котором одна из вершин конструкции определяется как оптимальная на предыдущем этапе (USLPOY). Поиск продолжается методом деформированного многогранника (NEMID). Для полученных этим методом геометрических размеров опоры определяется оптимальный тип решетки ствола с помощью комбинаторного алгоритма.

На последнем этапе целевая функция оптимизируется одним из методов координатного спуска. Наиболее эффективным методом оказался прямой поиск по Хуку-Дживсу (XUKGV), т. к. давал «наилучшие» (наименьшие) значение целевой функции. Завершал итерационный поиск подбор оптимального типа решетки комбинаторным алгоритмом.

Исходные данные проектирования с постоянными величинами поступают из главной программы (или при необходимости вводятся с клавиатуры) в программу оптимизационного расчета «POISK». Определение минимума целевой функции конструкции минимальной массы можно сделать одним или комбинацией нескольких оптимизационных методов (рис. 2). Подпрограмма вычисления целевой функции «CF» состоит из нескольких вычислительных блоков, которые определяют разные параметры каждой из групп элементов: пояса, раскосы, шпренгеля, диафрагмы.

Анализ результатов оптимизации, приведенный в таблице 1, позволяет сделать вывод: при одинаковых нагрузках и габаритах опоры существует объективный результат массы конструкции, который может быть достигнут из разных начальных проектов, отличающихся типами решеток, диафрагмами, узловыми соединениями, сечениями. При этом даже схема решетки не влияет на конечный результат.

Табл. 1. Результаты оптимизации опоры У220-2+5 из разных стартовых точек.

| Исходная опора | | Оптимальная опора | |
|---|--|--|---|
| Геометрическая схема | Тип диафрагмы | Геометрическая схема | Тип диафрагмы |
|  Масса 10321 кг | 1-1,2-2,3-3  |  Масса 8429 кг | 1-1,2-2,3-3 4-4,5-5  |
|  Масса 10197 кг | 1-1  |  Масса 8233 кг | 1-1  |

Программой предусмотрена возможность получения информации о каждом шаге итерационного процесса решения задачи, с целью его анализа и корректирования некоторых параметров. Предусмотрен графический контроль за ходом решения. Результаты оптимизационных расчетов подаются в табличной форме и выдаются в виде расчетных листов.

Программный комплекс позволяет решать задачи оптимального проектирования разных типов опор ВЛ; кроме того, есть возможность добавлять вычислительные блоки, которые позволяют расширить круг решаемых задач по проектированию экономичных опор.

Результаты оптимизационных расчетов разных типов опор ВЛ, которые значительно улучшают исходный проект, убеждают в целесообразности принятого подхода к оптимизации опор, т. к. в результате оптимизационного расчета определяется рациональная форма конструкции, которая в той или иной форме удовлетворяет заданному критерию оптимальности. Проведенные исследования позволили при оптимизации рассмотреть ВЛ как единую конструкционную систему, учесть пространственную работу конструкций опор, требования экономичности и технологичности.

РАЗРАБОТКА НОВЫХ ОПТИМАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ОПОР ВЛ 110 КВ

Оптимизационный расчет серии башенных опор ВЛ 110 кВ выполнялся в программном комплексе по расчету и оптимальному конструированию опор линий электропередачи «USL» [28].

При оптимизации конструкций анкерно-угловых опор 110 кВ заданными параметрами являлись база и ширина верхней части ствола, которая определяется электрическими габаритами. Варьировались количество и длины панелей, длины поясных секций, тип решетки и диафрагмы ствола, тип узловых сопряжений раскосов с поясами.

При разработке новых опор 110 кВ приняты следующие условия:

- материал опоры – малоуглеродистая сталь С245 ($R_y = 240$ МПа);
- токоведущие провода сталеалюминиевые марки АС 240/32, грозозащитный трос – С 50;
- ветровой пролет $l_{ветр} = l_{габ}$; весовой пролет $l_{вес} = 1,25 \cdot l_{габ}$ [29];
- климатические условия для расчета приняты в соответствии с главой 2.5 [30].

Геометрические схемы разработанных оптимальных анкерно-угловых опор ВЛ 110 кВ представлены на рисунке 3. Сравнение по массе типовых и оптимальных опор приведено в таблице 2.

Результатом оптимизации опоры У110-2+9 явилось снижение массы с 11,391 т до 8,383 т, или на 35,9%. Осуществлен переход с поясного уголка ·180С11 на ·160С10 для девятиметровой подставки оптимальной опоры.

Результаты исследований внедрены при изготовлении, монтаже и эксплуатации оптимальной опоры У110-2+14 ВЛ 110 кВ «Кременчуг – ГПП4» на территории Полтавского горно-обогатительного комбината, расположенного в г. Комсомольск, Украина (рис. 4).

Табл. 2. Сравнение масс типовых и оптимальных опор У110-2

| № п/п | Тип опоры | Масса опоры* | | Экономия на 1 опору по сравнению с типовой | |
|-------|-----------|----------------------|---------------------------|--|--------------|
| | | типовая опора, КМ | оптимальная опора, КМД | кг | % |
| 1 | У110-2 | 7704 8002 | 5676 5910 | 2028 2092 | 35,7 35,4 |
| 2 | У110-2+5 | 9717 10095 | 7185 7481 | 2532 2614 | 35,2 34,9 |
| 3 | У110-2+9 | 11391 11834 | 8383 8728 | 3008 3106 | 35,9 35,6 |
| 4 | У110-2+14 | 14643 15212 | 10476 10908 | 4176 4304 | 39,8 39,5 |

* в числителе – масса неокрашенной опоры; в знаменателе – масса опоры с цинковым покрытием

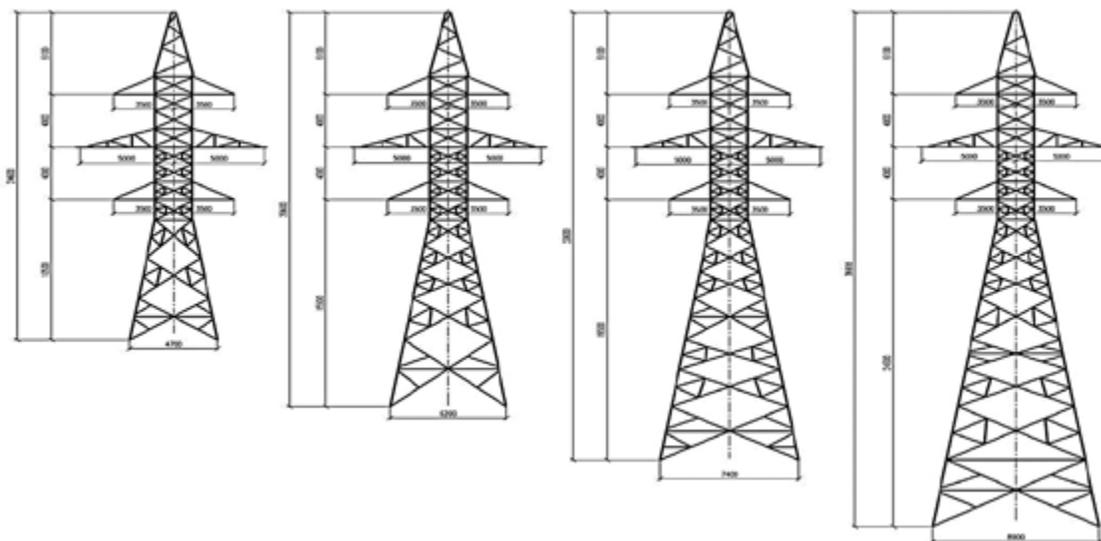


Рис. 3. Геометрические схемы оптимизированных анкерно-угловых опор У110-2: а) опора У110-2; б) опора У110-2+5; в) опора У110-2+9; г) опора У110-2+14

Эффективность заключается в снижении массы конструкции опоры на 39,5 % по сравнению с типовой опорой за счет более точного определения усилий в пространственной модели, пересчета коэффициентов продольного изгиба, введения сложной шпренгельной решетки, выбора оптимального типа профиля и узлов сопряжений.

НОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ ОПОР ВЛ ПОВЫШЕННОЙ НАДЕЖНОСТИ

В результате оптимального проектирования с использованием программного комплекса по расчёту и конструированию конструкций линий электропередачи получены новые типы одноцепных и двухцепных опор ВЛ напряжением 35 кВ и 110 кВ, а именно шесть одностоечных опор башенного типа: П-35-1, АУ-35-1, П-35-2, АУ-35-2, П-110-1, АУ-110-1 (рис. 5). Опоры одноствольные башенные решетчатые постоянного поперечного сечения, квадратного в плане.

Основным условием при разработке новых опор являлось выполнение основных технологических требований к надежной эксплуатации. В связи с этим для всех рассматриваемых опор приняты следующие условия: а) учтен вес гололеда на гирляндах изоляторов;

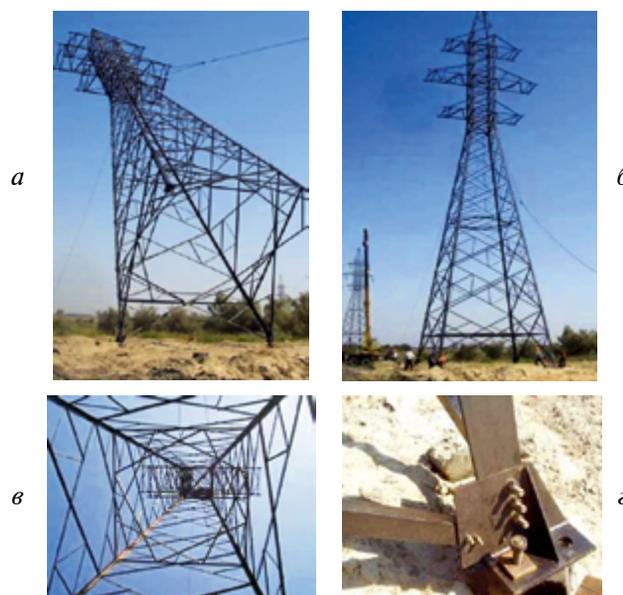


Рис. 4. Оптимальная двухцепная анкерно-уголовая опора У110-2+14: а) опора в процессе монтажа; б) общий вид смонтированной опоры; в) сложная шпренгельная решетка ствола; г) узел крепления опоры к фундаменту (башмак).

б) нормативные нагрузки от собственного веса монтируемых проводов, тросов и гирлянд приняты с учетом удвоенной массы ветровых пролетов; в) опоры рассчитаны на повышенные нагрузки от гололеда и ветра с повторяемостью не реже 1 раза в 50 лет.

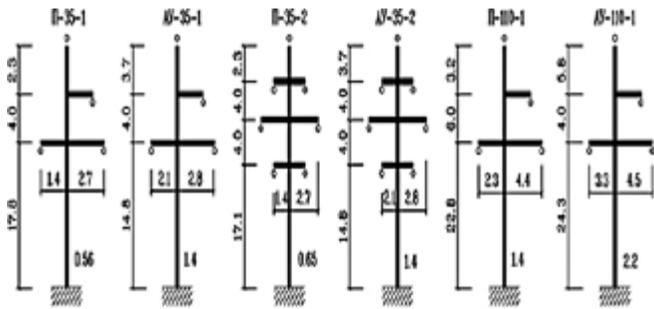


Рис. 5. Схемы унифицированных узкобазых опор башенного типа

Анкерно-угловые опоры рассчитывались на восемнадцать режимов загрузжений: четыре нормальных гололедных режима, восемь аварийных и шесть монтажных режимов. При этом учитывались углы поворота трассы до 60° и разность тяжений проводов в смежных пролетах. Промежуточные опоры рассчитывались на шесть режимов загрузжений: три нормальных (ветер поперек ВЛ, ветер под углом 45° к оси ВЛ и гололедный режим), два аварийных (обрыв провода и обрыв троса) и один монтажный режим.

Геометрическая схема разработанной узкобазой опоры повышенной надежности ВЛ 35 кВ приведена на рисунке 6. Массы башенных взаимозаменяемых опор приведены в табл. 3. Массы опор определялись с учетом вспомогательных деталей и метизов.

Автоматизированный расчет узкобазых опор ВЛ с определением расчетных усилий в элементах и подбором сечений с учетом конструктивных требований выполнялся по программам, разработанным на кафедре металлических конструкций Донбасской национальной академии строительства и архитектуры [28].

Таблица 3. Параметры взаимозаменяемых опор ВЛ 35 кВ и ВЛ 110 кВ

| Тип опоры | Высота, м | Масса, кг |
|--|-----------|-----------|
| Промежуточная одноцепная опора ВЛ 35 кВ | 24.1 | 1719 |
| | 20.1 | 1352 |
| Анкерно-угловая одноцепная опора ВЛ 35 кВ | 22.5 | 3421 |
| | 17.5 | 2645 |
| Промежуточная двухцепная опора ВЛ 35 кВ | 27.4 | 3755 |
| | 23.4 | 3042 |
| Анкерно-угловая двухцепная опора ВЛ 35 кВ | 26.7 | 6193 |
| | 21.7 | 5230 |
| Промежуточная одноцепная опора ВЛ 110 кВ | 32.0 | 3879 |
| | 28.0 | 3088 |
| Промежуточная двухцепная опора ВЛ 110 кВ | 38.0 | 6206 |
| | 34.0 | 5401 |
| Анкерно-угловая одноцепная опора ВЛ 110 кВ | 34.1 | 8430 |
| | 29.1 | 6831 |

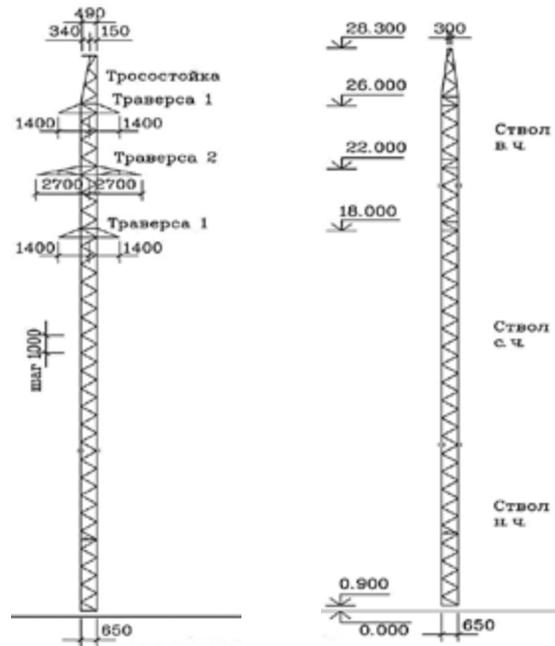


Рис. 6. Узкобазая промежуточная двухцепная опора ВЛ 35 кВ

Расчеты показали, что введение большего количества диагоналей и распорок оправдано, т. к. значительно снижаются усилия от изгиба в поясах ствола узкобазых опор.

По результатам выполненных исследований определены рациональные области применения узкобазых решетчатых опор башенного типа. Рассмотренные опоры рациональны в промежуточных одноцепных опорах ВЛ 35-110 кВ, особенно при больших высотах и незначительных нагрузках, а также в анкерно-угловых опорах напряжением 110 кВ при высоте опор до 27 м. В анкерно-угловых опорах ВЛ 35 кВ применение узкобазых опор дает положительный эффект для опор небольшой высоты (до 22 м).

ВЫВОДЫ

1. Созданная система одностадийного автоматизированного проектирования электросетевых конструкций включает программный комплекс оптимизационных расчетов проводов, тросов, конструкций опор и фундаментов.

2. Программный комплекс использован для разработки оптимальных двухцепных анкерно-угловых опор ВЛ 110 кВ, технологичных в изготовлении и монтаже. При этом масса опор уменьшилась до 39 % по сравнению с опорами ВЛ 110 кВ действующей унификации.

3. Выполненные исследования показали, что применение для ВЛ 35 и 110 кВ узкобазых опор позволяет получить экономию стали до 15 %, уменьшить расход железобетона на фундаменты до 35 % и в четыре раза сократить объем земляных работ при устройстве котлованов.

4. Разработанный метод оптимального проектирования опор ВЛ является универсальным и может быть применен к другим конструкциям – опорам ветроагрегатов и антенным опорам радиорелейной связи.

Список литературы

1. Kriukov, K. P.; Novgorodtsev, B. P. *Constructions and mechanical analysis of power transmission line*. 2nd edition. Leningrad: Energy, 1979. 312 p.
2. Vinogradov, D. *Construction of overhead power transmission lines 35-500 kV with severe track*, Energoatomizdat, Leningrad, 1983, 216 p.
3. Gorokhov, Ye. (Eds.); Shapovalov, S.; Udod, Ye. et al. *Growth of reliability and life of the power supply network construction*, Technics, Kyiv, 1997, 284 p.
4. Kryukov, K. *The crossings of transmission lines through of large water areas*, Energoatomizdat, Leningrad, 1982, 224 p.
5. Shevchenko, E. V. *Refinement of steel constructions of power transmission line support*. 2nd edition. Makiivka: DonSASEA, 1999. 169 p.
6. IEC 60826. *Design criteria of overhead transmission lines*. Third Edition. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2003. 241 p.
7. EN 50341-1: *Overhead electrical lines exceeding AC 45 kV. Part 1: General requirements – Common specifications*. Brussels: CENELEC, 2009. 234 p.
8. Nazim, Ya; Tanasoglo, A. *Investigation of stress-strain state of supports structures of large crossing of intersystem transmission line at reconstruction with replacement of conductors*, Metal Construction (2015) Vol. 21, No. 2, p. 49-61.
9. *Probabilistic design of overhead transmission lines: Companion document to "Improved design criteria of overhead transmission lines based on reliability concepts" (2000) CIGRE Brochure 109, SC 22, WG 06, 124 p.*
10. Wadell, Brian C. *Transmission Line Design*, Artech house, Norwood, 2005, 266 p.
11. Li, H.; Bai, H. *High-voltage transmission tower-line system subjected to disaster loads*, Progress in Natural Science (2006) Vol. 16, No. 9, p. 899-911.
12. Gorokhov, Ye. (Eds.); Kazakevich, M. et al. *Aerodynamics of the power supply structures*, Donetsk, 2000, 336 p.
13. Diana, G.; Bruni, S.; Cheli, F.; Fossati, F.; Manenti, A. *Dynamic analysis of the transmission line crossing "Lago de Maracaibo" (1997) EACWE, Genova, Italy, pp. 1759-1766.*
14. Gaudry, M.; Chore, F.; Hardy C.; Ghannoum E. *Increasing the ampacity of overhead lines using homogeneous compact conductors (1998) Report CIGRE 22-201, Paris.*
15. Chen, Y., Farzaneh, M., Lozowski E., Szilder K. *Modeling of ice accretion on transmission line conductors (2000) Proc. of the IX International Workshop on Atmospheric Icing of Structures (IWAIS), E A Technology, Chester, United Kingdom, Session 7a, p. 1-8.*
16. Sokolov, A.G. *Support of power transmission lines (calculation and construction) (1961) Moscow: Gosstroyizdat, 171 p.*
17. Shevchenko, Ye.; Glukhov, V.; Tanasoglo, A. *The stress-strain state research of the double circuit anchor support of the OPTL 330kV used different software package*, Metal Structures (2010) Vol. 16, No. 1, pp. 31-39.
18. Nazim, Ya; Shevchenko, Ye. *Reconstruction of large transmission line crossing on the River Dnieper in Kremenchuk*, Modern industrial and civil construction (2014) Vol. 10, No. 2, p. 83-95.
19. Shevchenko, Ye.; Nazim, Ya.; Tanasoglo, A.; Garanzha, I. *Refinement of wind loads on lattice support structures of the intersystem overhead power transmission lines 750 kV*, Procedia Engineering (2015) 117, pp. 1033-1040.
20. Couneson, P.; Lamsoul J.; Delplanque D.; Capelle Th. *Improving the performance of existing high-voltage overhead lines by using compact phase and ground conductors (2013) Proc. CIGRE, Paris, p. 18-76.*
21. G. Arzhakov *Metal structures. Special buildings and structures*, vol.3, 544 (2002).
22. A. Perelmuter *Computational models of structures and the possibility of their analysis*, 618 (2002).
23. Tanasoglo, A.; Garanzha, I.; Glukhov, V. *Dynamicity coefficient refinement for intermediate support P110-6 under the action of the pulsation component of the wind load*, Metal Structures (2015) Vol. 21, No. 1, pp. 39-48.
24. Lamsoul, J.; Rogier, J.; Couneson, P.; Van Overmeere, A. *Belgian experience on initiatives to improve the capability of existing overhead lines (2000) Report CIGRE 22-206, Paris.*
25. DBN B.2.6 – 163:2010 *Steel structures. Standards of design, manufacturing and installation*, 202 (2011).
26. *Manual for design of steel structures of overhead transmission line supports (OHTL) and power outdoor switchgear (OSG) substations with voltage up to 1kV (to SNiP II-23-81*)*, 72 (1989).
27. *Design of Latticed Steel Transmission Structures / American Society of Civil Engineers. ANSI/ASCE 10-90, A.N.S.I. – New York (USA). – 1991. – 64 p.*
28. Tanasoglo, A. *Optimal design solutions of double-circuit corner dead-end supports of overhead power transmission lines 110 kV*, Modern industrial and civil construction (2015) Vol. 11, No. 1, pp. 5-14.
29. Gaudry, M.; Chore, F.; Hardy C. *Increasing the ampacity of overhead lines using homogeneous compact conductors (2008) Proc. CIGRE, Paris, p. 180-201.*
30. *Rules for electrical installation. Head 2.5 «The overhead power transmission lines voltages above 1 kV to 750 kV»*. Kyiv: GRIFRE, 2006. 125 p.
31. Горохов, Е. В. *Методика проведения испытаний антенных опор на Полигоне ДонНАСА [Текст] / Е. В. Горохов, В. Н. Васылев, А. М. Алехин // Металлические конструкции. – 2010. – Том 16, №3. – С. 151 – 161.*