

УДК 621.315.1:624.014

DOI: 10.31675/1607-1859-2018-20-4-74-85

*И.М. ГАРАНЖА¹, А.В. ТАНАСОГЛО²,**¹Национальный исследовательский**Московский государственный строительный университет,**²Донбасская национальная академия строительства и архитектуры*

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ АНКЕРНО-УГЛОВОЙ ДВУХЦЕПНОЙ ОПОРЫ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ 110 КВ

Выполнен анализ напряженно-деформированного состояния анкерно-угловой опоры воздушной линии, которая рассматривается как пространственная многократно статически неопределимая сквозная система с жесткими узлами. Приводятся методика и результаты расчета пространственной модели опоры в программном комплексе SCAD. Уделено внимание основным проблемам, которые могут возникнуть при задании исходных данных и построении расчетных схем для расчета таких конструкций. Рассматривается ряд вопросов, связанных с уточненным определением внутренних продольных усилий в элементах конструкции опоры воздушной линии. При расчете анализируется совместная работа элементов решетки пространственной модели опоры, учитывается включение в работу диафрагм жесткости и раскосов по всем четырем граням. На основании расчета и обобщения результатов выполнено детальное сравнение полученных внутренних усилий с усилиями, определенными в элементах типовой опоры воздушной линии от одинаковых значений нагрузок.

Ключевые слова: воздушная линия электропередачи; пространственная модель; металлическая опора; расчетные нагрузки; диафрагма жесткости.

Для цитирования: Гаранжа И.М., Танасогло А.В. Анализ напряженно-деформированного состояния анкерно-угловой двухцепной опоры воздушной линии электропередачи 110 кВ // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. Т. 20. № 4. С. 74–85.

*I.M. GARANZHA¹, A.V. TANASOGLO²,**¹The National Research Moscow State Civil Engineering University,**²Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*

STRESS-STRAIN STATE ANALYSIS OF ANGLE-TENSION, TWO-CIRCUIT 110 kW SUSPENSION TOWER

The analysis stress-strain state is performed for the angle-tension, two-circuit suspension tower as a spatial, statically indeterminate system with rigid joints. SCAD software is used to create a solid 3D CAD angle-tension, two-circuit suspension tower. The attention is paid to the problems arising in specifying initial data and structural design. Issues, connected with the calculation of the internal longitudinal forces in the suspension tower elements are considered. The analysis includes the joint work of the lattice elements in the 3D model of the suspension tower and the involvement of stiffening diaphragms and cross stays in all the four sides. As a result, a detailed comparison is provided for obtained internal efforts with those found in the suspension tower elements due to identical values of loadings.

Keywords: overhead transmission line; three-dimensional model; metal support; design loads; stiffening diaphragm.

For citation: Garanzha I.M., Tanasoglo A.V. Analiz napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya ankerno-uglovoi dvukhtsepoi opory vozduшной линии электропередачи 110 kV [Stress-strain state analysis of angle-tension, two-circuit 110 kV suspension tower]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2018. V. 20. No. 4. Pp. 74–85. (rus)

В настоящее время в энергосистемах стран СНГ эксплуатируется около 600 тыс. км воздушных линий (ВЛ) электропередач на металлических опорах, общая масса которых достигает 5 млн т. Массовый характер возведения опор ВЛ особенно остро ставит вопрос повышения эффективности, долговечности и надежности энергетического строительства, поэтому поиск путей дополнительной экономии стали при строительстве высоковольтных линий и пересмотр существующих типовых проектов представляет важную задачу.

В условиях рыночной экономики конструкции опор ВЛ должны обладать низкой стоимостью и гарантированным качеством, на изготовление которых будет расходоваться минимальное количество стали. Поэтому необходимо совершенствование опор ВЛ, которое возможно путем уточнения усилий в элементах опор и при проектировании с использованием численных методов.

Так как в последнее время принята позиция индивидуального строительства линий электропередач, то уточнение внутренних усилий в типовых опорах для дальнейшей их оптимизации является актуальной задачей при новом проектировании.

Воздушная линия электропередачи представляет собой сложное инженерное сооружение, в котором гибкие элементы (провода и тросы) работают совместно с жесткими (опорами), и при этом вся сеть предварительно напряжена [1].

Элементы опор рассматриваются как пространственные системы, нагруженные силами, которые также расположены в пространстве. Эти элементы в большинстве случаев имеют призматическую или пирамидальную форму с малыми углами наклона поясов к продольной оси. Существует мнение [2], что в этих случаях расчет пространственных элементов достаточно производить путем разложения нагрузок на составляющие в плоскостях граней и сводить к расчету плоских ферм под действием системы сил, лежащих в плоскости фермы.

В работе [3] изложены основные принципы расчета сложных инженерных сооружений, реализованного в ПК SCAD и аналогичных вычислительных комплексах, основанных на методе конечных элементов.

Расчет анкерно-угловой опоры У110-2+9 в SCAD и сравнение результатов расчета

Целью настоящей работы является анализ напряженно-деформированного состояния анкерно-угловой опоры ВЛ и сравнение результатов расчета внутренних усилий с типовой опорой.

Действительная расчетная схема металлической решетчатой опоры башенного типа – это пространственная многостержневая многократно статически неопределимая сквозная система с жесткими узлами [11].

Расчет опоры ВЛ с учетом всех ее свойств, точных геометрических размеров, строгого взаимодействия элементов в узлах является нереализуемым на современном этапе из-за своей сложности. Поэтому при типовом проектировании пространственная конструкция опоры ВЛ, воспринимающая и передающая на фундаменты все нагрузки и воздействия, заменяется расчетными схемами и расчленяется на элементы – плоские фермы (рис. 1, а) [8–10].

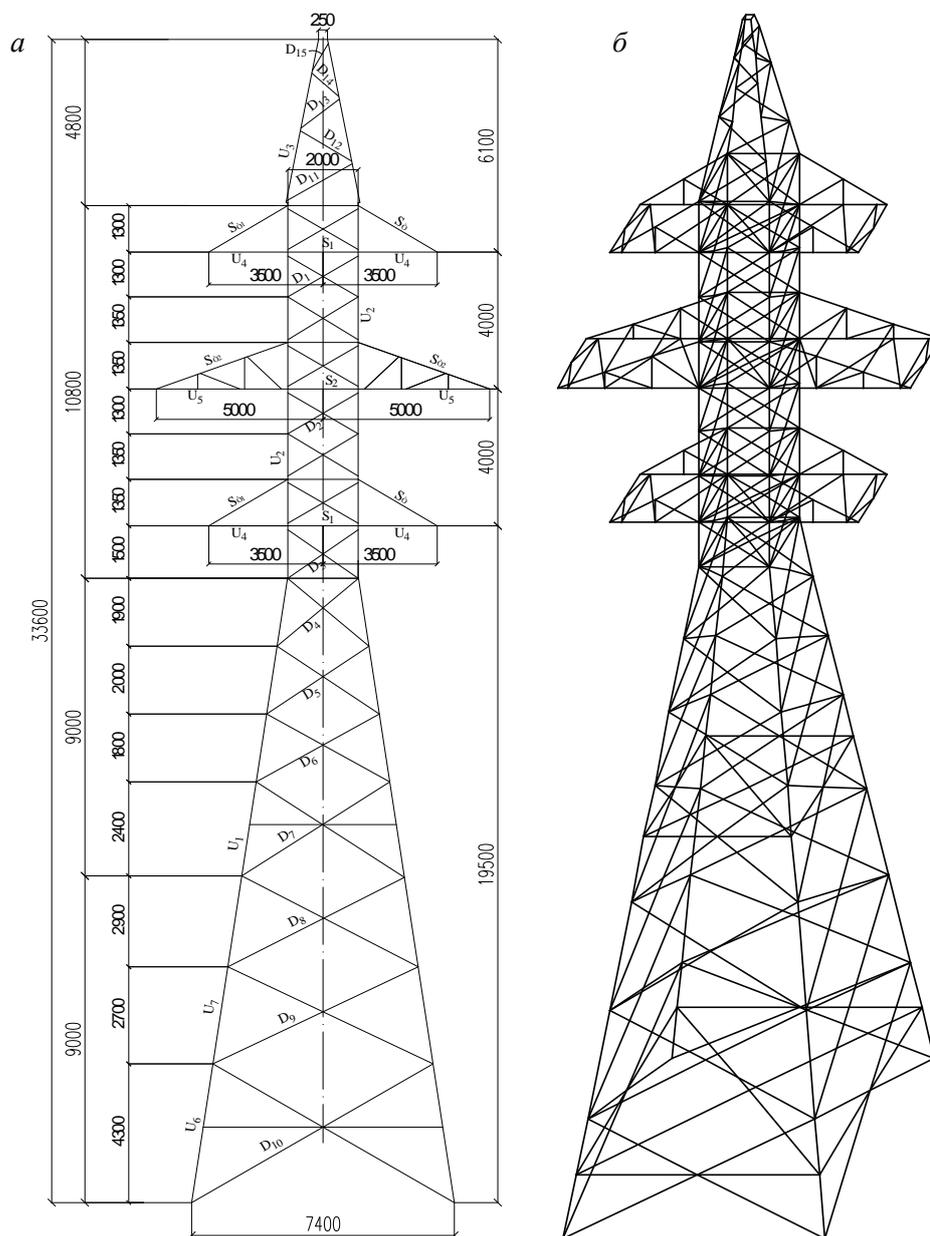


Рис. 1. Расчетная схема анкерно-угловой опоры ВЛ У110-2+9:
а – геометрическая схема опоры; б – общий вид опоры

Производится схематизация опоры, и отбрасываются второстепенные факторы, которые не влияют на достоверность и требуемую точность расчета. Данные операции приводят к погрешностям в определении усилий, которые при расчете стальных конструкций частично компенсируются приближенным учетом пространственной работы. Исследования действительной работы решетчатых опор башенного типа показали, что такое приближение приводит к очень небольшим погрешностям в величине нормальных сил, действующих в стержнях всей системы [9–11].

Расчетной схемой опоры башенного типа является упрощенная, идеализированная схема, которая отражает наиболее существенные особенности реальной опоры, определяющей ее поведение под нагрузкой. Так, общепринято пренебрегать жесткостью узлов при определении усилий, считая их шарнирными. В дальнейшем жесткость узлов учитывается при определении расчетных длин стержней опоры ВЛ. Подобное допущение значительно упрощает расчет [10, 11, 14–17, 19–21].

Построение пространственной модели опоры ВЛ было выполнено в программном комплексе SCAD (рис. 1, б).

Для создания пространственной модели опоры были приняты следующие допущения: в расчетной схеме стержневой конструкции стержни заменялись их продольными осями, реальные опорные устройства заменялись идеальными опорными связями, собранные нагрузки с поверхности стержней переносились на оси [8, 15–18].

Расчет опоры У110-2+9 производится на нагрузки для 3-го ветрового района. Статическая составляющая, соответствующая установившемуся скоростному напору, принимается по [12, 13] равной $q_0 = 0,5$ кПа.

Суммарное давление ветра на конструкцию опоры $P_{\text{расч}} = 6436$ кг.

Дальнейшая схематизация конструкции опоры состоит в определении ее расчетных размеров. По имеющимся генеральным размерам опоры в плоскости и из плоскости, габаритам сечений отдельных стержней опоры устанавливались все необходимые длины элементов, входящих в пространственную модель опоры.

Последовательность ввода исходных данных для создания моделей: построение расчетной схемы, описание условий закрепления конструкции опоры в пространстве, назначение жесткостей элементов конструкции, создание схем загружений конструкции опоры, составление расчетных комбинаций загружений, выполнение расчета, анализ результатов расчета и сравнение полученных внутренних усилий в расчетных схемах.

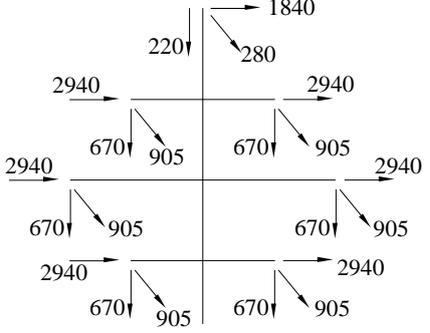
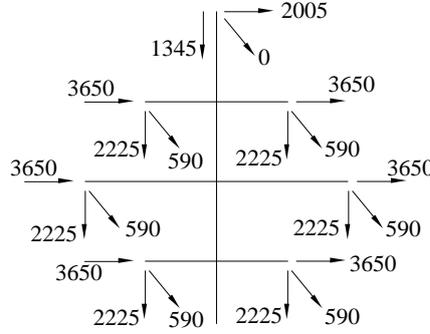
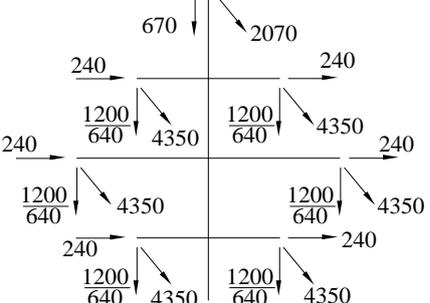
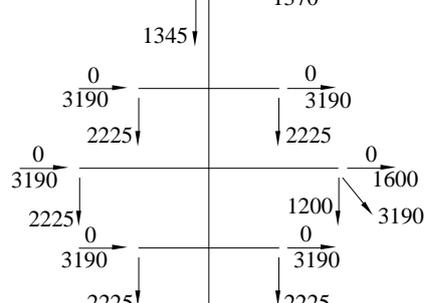
Расчет анкерно-угловой опоры ВЛ У110-2+9 производится на 5 схем загружений (табл. 1).

После расчета программа SCAD автоматически выдает внутренние усилия в стержнях опоры ВЛ (продольные усилия сжатия и растяжения) по каждой схеме нагружения.

По результатам расчета выявляются максимальные усилия, возникающие в элементах опоры, производится их анализ и сравнение полученных результатов расчета с усилиями, определенными в типовой опоре У110-2+9.

Таблица 1

Схемы расчетных нагрузок на опору У110-2+9

| № п/п | Характеристика схем | Схема загрузки |
|-------|--|--|
| I | Провода и трос не оборваны и свободны от гололеда Ветер направлен вдоль осей траверс $t = 5 \text{ }^\circ\text{C}$; $C = 0$ $q_{\text{п}}^{\text{н}} = 50 \text{ кг/м}^2$; $q_{\text{т}}^{\text{н}} = 74 \text{ кг/м}^2$ I район гололеда $\alpha = 60^\circ$ Разность тяжений Провод АС-240/32, трос С-50 |  |
| II | Провода и трос не оборваны и покрыты гололедом Ветер направлен вдоль осей траверс $t = -5 \text{ }^\circ\text{C}$; $C = 20 \text{ мм}$ $q_{\text{п}}^{\text{н}} = 14 \text{ кг/м}^2$; $q_{\text{т}}^{\text{н}} = 16,5 \text{ кг/м}^2$ IV район гололеда $\alpha = 50^\circ$ Разность тяжений Схема является расчетной для поясов ствола опоры |  |
| IIIк | Опора концевая Провода и трос не оборваны и покрыты гололедом Ветер направлен вдоль осей траверс $t = -5 \text{ }^\circ\text{C}$; $C = 20 \text{ мм}$ $q_{\text{п}}^{\text{н}} = 14 \text{ кг/м}^2$; $q_{\text{т}}^{\text{н}} = 16,5 \text{ кг/м}^2$ IV район гололеда $\alpha = 0^\circ$ Схема является расчетной для тростойки, поясов и раскосов траверс |  |
| III | Оборван провод, дающий наибольший изгибающий и крутящий моменты на опору Трос не оборван $t = 5 \text{ }^\circ\text{C}$; $C = 0$; $q = 0$ IV район гололеда $\alpha = 60^\circ$; $\alpha = 0^\circ$ Схема является расчетной для раскосов ствола опоры, пояса траверсы |  |

Окончание табл. 1

| № п/п | Характеристика схем | Схема загрузки |
|-------|---|----------------|
| Шк | Опора концевая Оборван провод, дающий наибольший крутящий момент на опору Трос не оборван $t = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$; $C = 20\text{ мм}$; $q = 0$ IV район гололеда $\alpha = 0^{\circ}$ Схема является расчетной для раскосов ствола опоры | |

Сравнение полученных внутренних усилий с усилиями, определенными в элементах типовой анкерно-угловой опоры У110-2+9, приведено в табл. 2.

Таблица 2

Сравнительный анализ усилий в типовой и оптимальной опорах У110-2+9

| Часть опоры | Наименование элементов опоры | Обозначение элементов | Расчетные усилия сжатия N , т | | Изменение усилий | | Сечения элементов опор | |
|----------------------------------|------------------------------|-----------------------|---------------------------------|-------|------------------|-------|------------------------|----------|
| | | | Тип. | Опт. | т | % | Тип. | Опт. |
| Нижняя секция | Пояс | U_1 | 53,4 | 54,78 | +1,38 | +2,5 | └ 160x10 | └ 160x10 |
| | Раскос | D_4 | 2,96 | 3,17 | +0,21 | +6,6 | └ 70x6 | └ 50x4 |
| | Раскос | D_5 | 2,25 | 2,11 | -0,14 | -6,2 | └ 70x6 | └ 50x4 |
| | Раскос | D_6 | 1,67 | 1,69 | +0,02 | +1,1 | └ 70x6 | └ 50x4 |
| | Раскос | D_7 | 1,46 | 1,32 | -0,14 | -9,5 | └ 90x7 | └ 50x4 |
| | Раскос | D'_4 | 3,21 | 3,53 | +0,32 | +9,1 | └ 70x6 | └ 50x4 |
| | Раскос | D'_5 | 2,40 | 2,55 | +0,15 | +5,9 | └ 70x6 | └ 50x4 |
| | Раскос | D'_6 | 1,80 | 1,81 | +0,01 | +0,5 | └ 70x6 | └ 50x4 |
| Подставка ($H = 9,0\text{ м}$) | Пояс | U_6 | 57,3 | 56,65 | -0,65 | -1,1 | └ 180x11 | └ 160x10 |
| | Раскос | D_8 | 1,06 | 1,09 | +0,03 | +2,8 | └ 70x6 | └ 60x5 |
| | Раскос | D_9 | 0,96 | 0,95 | -0,01 | -1,1 | └ 70x6 | └ 63x5 |
| | Раскос | D_{10} | 0,88 | 0,79 | -0,09 | -10,2 | └ 110x8 | └ 70x5 |
| | Раскос | D'_8 | 1,13 | 1,05 | -0,08 | -7,1 | └ 70x6 | └ 60x5 |
| | Раскос | D'_9 | 1,03 | 0,98 | -0,05 | -4,8 | └ 70x6 | └ 63x5 |
| | Раскос | D'_{10} | 0,97 | 0,69 | -0,28 | -28,8 | └ 110x8 | └ 70x5 |

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 MISI1, разработанном в Донбасской национальной академии строительства и архитектуры [4, 5].

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.

В качестве примера произведенного оптимизационного расчета приведена табл. 2, в которой выполнен сравнительный анализ расчетных усилий и сечений стержней для нижней секции и подставки ($H = 9,0$ м) типовых и оптимальных анкерно-угловых опор У110-2+9. Обозначение элементов в табл. 2 принято в соответствии с рис. 1, а.

Результатом оптимизации опоры У110-2+9 явилось снижение массы с 11,391 до 8,383 т, или на 35,9 %. Осуществлен переход с поясного уголка $\perp 180 \times 11$ на $\perp 160 \times 10$ для 9-метровой подставки оптимальной опоры [6, 7].

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

Таблица 3

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 | $\frac{7704}{8002}$ | $\frac{5676}{5910}$ | $\frac{2028}{2092}$ | $\frac{35,7}{35,4}$ |
| | | | | | |
| 2 | У110-2+5 | $\frac{9717}{10095}$ | $\frac{7185}{7481}$ | $\frac{2532}{2614}$ | $\frac{35,2}{34,9}$ |
| | | | | | |
| 3 | У110-2+9 | $\frac{11391}{11834}$ | $\frac{8383}{8728}$ | $\frac{3008}{3106}$ | $\frac{35,9}{35,6}$ |
| | | | | | |
| 4 | У110-2+14 | $\frac{14643}{15212}$ | $\frac{10476}{10908}$ | $\frac{4176}{4304}$ | $\frac{39,8}{39,5}$ |
| | | | | | |

* В числителе – масса неокрашенной опоры, в знаменателе – масса опоры с цинковым покрытием.

Результаты исследований внедрены при изготовлении, монтаже и эксплуатации оптимальной опоры У110-2+14 ВЛ 110 кВ «Кременчуг – ГПП4» на территории Полтавского горно-обогатительного комбината (ГОК), расположенного в г. Комсомольске (рис. 3, 4) [6].

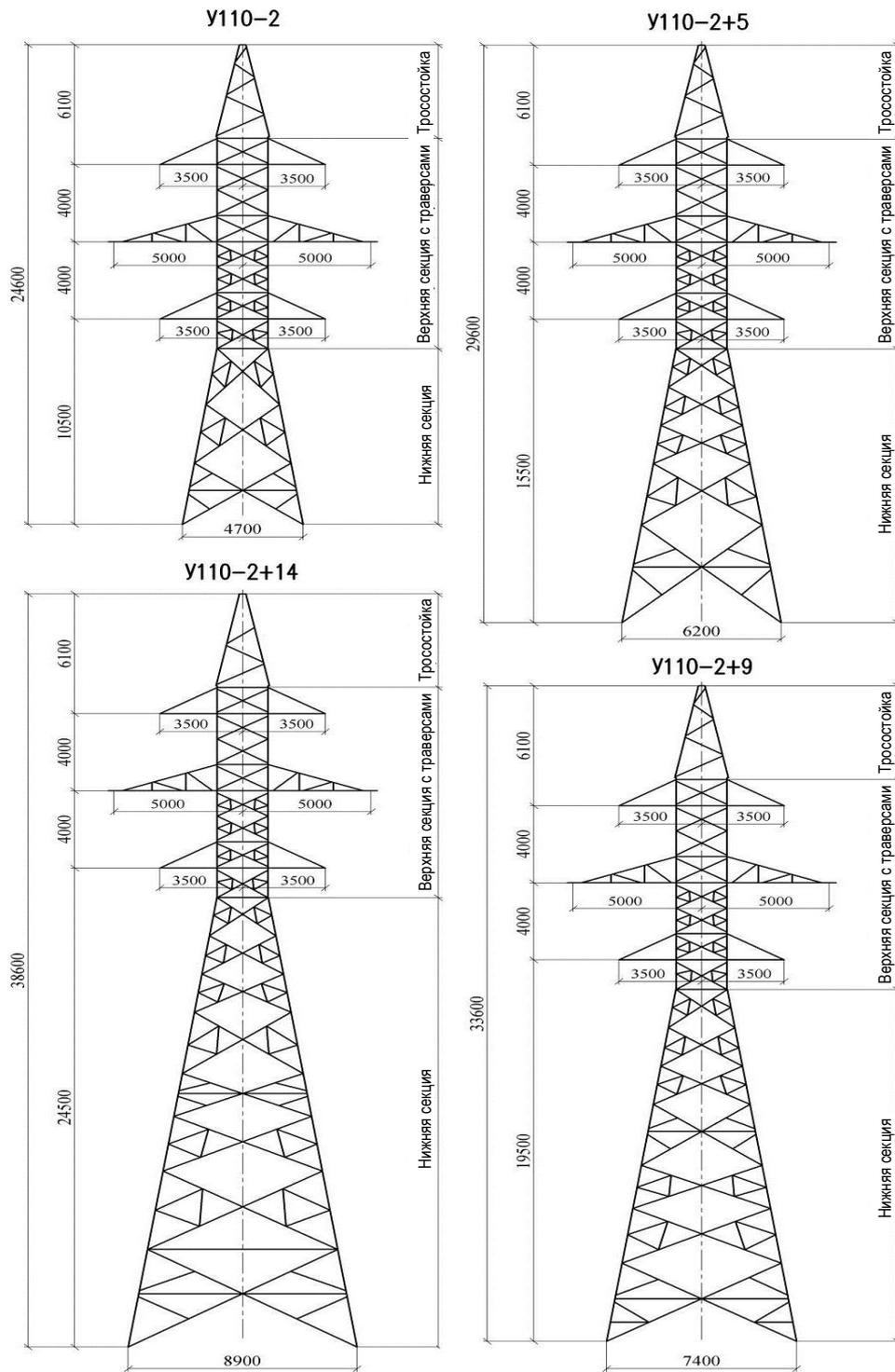


Рис. 2. Геометрические схемы оптимизированных анкерно-угловых опор Y110-2



Рис. 3. Оптимальная анкерно-угловая опора У110-2+14 в процессе монтажа



Рис. 4. Общий вид смонтированной оптимальной опоры 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 узловых сопряжений.

Выводы

1. Впервые разработаны оптимальные двухцепные анкерно-угловые опоры ВЛ 110 кВ, технологичные в изготовлении и монтаже. При этом масса опор уменьшилась на 35,2–39,8 % по сравнению с опорами ВЛ 110 кВ действующей унификации.

2. Усовершенствованы методика и алгоритмы оптимизации опор ВЛ с учетом полученных зависимостей для расчетных длин и коэффициентов продольного изгиба, которые реализованы в программном комплексе оптимального проектирования MISI1, разработанном в ДонНАСА.

3. Запроектированная оптимальная башенная опора У110-2+14 возведена на территории Полтавского ГОК (г. Комсомольск), эффективность разработки которой заключается в снижении массы конструкции на 39,5 % по сравнению с типовой опорой.

4. При расчете пространственной модели анкерно-угловой опоры ВЛ У110-2+9 в результате совместной работы элементов решетки (за счет включения в работу диафрагм жесткости и раскосов по всем четырем граням) наблюдается снижение внутренних усилий в элементах пространственной модели в среднем на 18 %, по сравнению с усилиями, определенными в типовой опоре ВЛ от одинаковых значений нагрузок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Зеличенко А.С., Смирнов Б.И.* Проектирование механической части воздушных линий сверхвысокого напряжения. М.: Энергоиздат, 1981. 336 с.
2. *Справочник по проектированию линий электропередачи* / под ред. С.С. Рокотяна, М.А. Реута. М.: Энергия, 1980. 296 с.
3. *Перельмутер А.В., Сливкер В.И.* Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. Киев: ВПП «SCAD», 2001. 448 с.
4. *Шевченко Е.В., Танасогло А.В.* Оптимальное проектирование конструкций башенных анкерно-угловых опор ВЛ 110 кВ // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Здания и сооружения с применением новых материалов и технологий: сб. науч. тр. Макеевка: ДонНАСА, 2013. Вып. 2013-3 (101). С. 114–116.
5. *Пустогвар А.П., Танасогло А.В., Гаранжа И.М., Шилова Л.А., Адамцевич А.О.* Оптимальное проектирование решетчатых металлических конструкций воздушных линий электропередачи // МАТЕС Web of Conferences. 2016. № 86. 04003. P. 19–28.
6. *Танасогло А.В.* Узкобазые конструкции решетчатых опор воздушных линий повышенной надежности // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Здания и сооружения с применением новых материалов и технологий: сб. науч. тр. Макеевка: ДонНАСА, 2015. Вып. 2015-3 (113). С. 50–53.
7. *Танасогло А.В.* Оптимальные конструктивные решения двухцепных анкерно-угловых опор линий электропередачи 110 кВ // Современное промышленное и гражданское строительство. Макеевка: ДонНАСА, 2015. Т. 11. № 1. С. 5–14.
8. *Танасогло А.В.* Численно-аналитическая методика решения задачи устойчивости пространственных решетчатых конструкций // Металлические конструкции. Макеевка: ДонНАСА, 2015. Т. 21. № 3. С. 107–117.
9. *Танасогло А.В.* Исследование устойчивости решетчатых стальных опор линий электропередачи // Современные строительные конструкции из металла и древесины: сб. науч. тр. Одесса: ОГАСА, 2011. № 15. Ч. 3. С. 233–238.
10. *Крюков К.П., Новгородцев Б.П.* Конструкции и механический расчёт линий электропередачи. 2-е изд. Л.: Энергия, 1979. 312 с.
11. *Шевченко Е.В.* Совершенствование металлических конструкций опор воздушных линий электропередачи. 2-е изд. Макеевка: ДонГАСА, 1999. 169 с.
12. *Горохов Е.В., Казакевич М.И., Шаповалов С.Н., Назим Я.В.* Аэродинамика электросетевых конструкций. Донецк, 2000. 336 с.
13. *ДБН В.2.6.163:2016.* Стальные конструкции. Нормы проектирования. Киев: Минрегион Украины, 2016. 195 с.
14. *Gorokhov E.V.* Durability of Steel Structures Under Reconstruction. Rotterdam: Brookfield, 1999. 297 с.
15. *Dobbs M.W., Felton L.P.* Optimization of truss geometry // J. of Str. Div., ASCE. 1969. V. 95. P. 2105–2118.
16. *Friedland L.R.* Geometric structural behavior. Thesis presented to Columbic University, at New York, 1971. 98 p.
17. *Ghannoun E.* Reliability and security concepts applied to structural design of transmission lines // 10th Annual Eng. Conf. on Reliability. Availab., Maintainab of Electric Power Jnt // Monreal, May. 1983. P. 988–991.
18. *IEEE Transactions on PAS.* 1981. V. 100. № 7. P. 12.
19. *Schmit L.A.* Structural design by systematic synthesis // Proc. of the Second ASCE Conf. on Electric Comput. Pittsburg, 1960. P. 105–122.

20. *Spillers W.R.* Iterative design for optimal geometry // *J. of Str. Div., ASCE*. 1975. V. 101. P. 1435–1442.
21. *Wood A.O., Mclellan M.* Transmission line design the ultimate load concept // *CIGRE*. 1982. Rep. 22-01.

REFERENCES

1. *Zelichenko A.S., Smirnov B.I.* Proektirovanie mekhanicheskoi chasti vozdushnykh linii sverkhvysokogo napryazheniya [Design of mechanical part of overhead lines]. Moscow: Energoizdat, 1981. 336 p. (rus)
2. *Rokotyayn S.S., Reut M.A. (Eds.)* Spravochnik po proektirovaniyu linii elektroperedachi [Guide to the design of power lines]. Moscow: Energiya, 1980. 296 p. (rus)
3. *Perel'muter A.V., Slivker V.I.* Raschetnye modeli sooruzhenii i vozmozhnost' ikh analiza [Design models of structures and their analysis]. Kiev: SCAD, 2001. 448 p. (rus)
4. *Shevchenko E.V., Tanasoglo A.V.* Optimal'noe proektirovanie konstruksii bashennykh ankeru-uglovykh opor VL 110 kV [Optimal design of angle-tension, two-circuit 110 KW suspension towers]. *Vestnik Donbasskoi natsional'noi akademii stroitel'stva i arkhitektury. Zdaniya i sooruzheniya s primeneniem novykh materialov i tekhnologii*. 2013. No. 2013-3 (101). Pp. 114–116. (rus)
5. *Pustogvar A.P., Tanasoglo A.V., Garanzha I.M., Shilova L.A., Adamtsevich A.O.* Optimal'noe proektirovanie reshetchatykh metallicheskih konstruksii vozdushnykh linii elektroperedachi [Optimal design of lattice metal structures of overhead transmission lines]. *MATEC Web of Conferences*. 2016. No. 86. 04003. Pp. 19–28. (rus)
6. *Tanasoglo A.V.* Uzkobazye konstruksii reshetchatykh opor vozdushnykh linii povyshennoi nadezhnosti [Narrow-base structures of lattice supports of high-reliable overhead lines]. *Vestnik Donbasskoi natsional'noi akademii stroitel'stva i arkhitektury. Zdaniya i sooruzheniya s primeneniem novykh materialov i tekhnologii*. 2015. No. 2015-3 (113). Pp. 50–53. (rus)
7. *Tanasoglo A.V.* Optimal'nye konstruktivnye resheniya dvukhtsepykh ankeru-uglovykh opor linii elektroperedachi 110 kV [Optimal design solutions for angle-tension, two-circuit 110 KW suspension towers]. *Sovremennoe promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2015. V. 11. No. 1. Pp. 5–14. (rus)
8. *Tanasoglo A.V.* Chislenno-analiticheskaya metodika resheniya zadachi ustoychivosti prostanstvennykh reshetchatykh konstruksii [Numerical-analytical technique for solving the problem of stability of spatial lattice structures]. *Metallicheskie konstruksii*. 2015. T. 21. No. 3. Pp. 107–117. (rus)
9. *Tanasoglo A.V.* Issledovanie ustoychivosti reshetchatykh stal'nykh opor linii elektroperedachi [Investigation of stability of lattice steel towers of power transmission lines]. *Sovremennye stroitel'nye konstruksii iz metalla i drevesiny*. 2011. No. 15. Pt. 3. Pp. 233–238. (rus)
10. *Kryukov K.P., Novgorodtsev B.P.* Konstruksii i mekhanicheskii raschet linii elektroperedachi [Design and mechanical calculation of power lines]. 2nd ed. Leningrad: Energiya, 1979. 312 p. (rus)
11. *Shevchenko E.V.* Sovershenstvovanie metallicheskih konstruksii opor vozdushnykh linii elektroperedachi [Improvement of metal structures of overhead power transmission lines]. 2nd ed. Makeevka: DonGASA, 1999. 169 p. (rus)
12. *Gorokhov E.V., Kazakevich M.I., Shapovalov S.N., Nazim Ya.V.* Aerodinamika elektrosetyykh konstruksii [Aerodynamics of electric grid structures]. Donetsk, 2000. 336 p. (rus)
13. *DBN V.2.6.163:2016. Stal'nye konstruksii. Normy proektirovaniya* [Steel structures. Design standards]. Kiev: Minregion Ukrainy, 2016. 195 p. (rus)
14. *Gorokhov E.V.* Durability of steel structures under reconstruction. Rotterdam: Brookfield, 1999. 297 p.
15. *Dobbs M.W., Felton L.P.* Optimization of truss geometry. *Journal of the Structural Division, ASCE*. 1969. V. 95. Pp. 2105–2118.
16. *Friedland L.R.* Geometric structural behavior. Thesis presented to Columbic University, New York, 1971. 98 p.

17. *Ghannoum E.* Relisbility and security concepts applied to structural design of transmission lines. *Proc. 10th Annual Eng. Conf. on Reliability. Availab., Maintainab of Electric Power Jnt.* May. 1983. Pp. 988–991.
18. *IEEE Transactions on PAS.* 1981. V. 100. No. 7. P. 12.
19. *Schmit L.A.* Structural design by systematic synthesis. *Proc. 2nd ASCE Conference on Electronic Computation.* Pittsburg, 1960. Pp. 105–122.
20. *Spillers W.R.* Iterative design for optimal geometry. *Journal of the Structural Division, ASCE.* 1975. V. 101. Pp. 1435–1442.
21. *Wood A.O., Mcllellan M.* Transmission line design the ultimate load concept. CIGRE. 1982. Rep. 22-01.

Сведения об авторах

Гаранжа Игорь Михайлович, доцент, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26, garigo@mail.ru

Танасогло Антон Владимирович, канд. техн. наук, доцент, Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, 86123, Украина, г. Макеевка, ул. Державина, 2, a.v.tan@mail.ru

Authors Details

Igor M. Garanzha, A/Professor, The National Research Moscow State Civil Engineering University, 26, Yaroslavskoe Road, Moscow, Russia, 129337, garigo@mail.ru

Anton V. Tanasoglo, PhD, A/Professor, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, 2, Derzhavin Str., Donetsk Region, 86123, Makiyivka, Ukraine, 86123, a.v.tan@mail.ru