

## Совершенствование конструкций решетчатых башенных опор воздушных линий электропередачи

*И.М. Гаранжа<sup>1</sup>, А.В. Танасогло, С.А. Фоменко<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> *Национальный исследовательский московский государственный строительный университет*

<sup>2</sup> *ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,  
Макеевка, Украина*

**Аннотация:** В статье рассмотрено совершенствование опор воздушных линий (ВЛ) путем их оптимизации и автоматизации проектирования, включая создание расчетной модели ВЛ как единой системы и алгоритм ее решения. Выполнен анализ напряженно-деформированного состояния и оптимизация конструктивных форм ствола опор с учетом требований экономичности и технологичности. Создана система автоматизированного одностадийного проектирования опор ВЛ.

**Ключевые слова:** воздушная линия электропередачи, оптимальное проектирование, решетчатая опора, расчетная модель.

### Актуальность темы

Быстрое и эффективное совершенствование опор воздушных линий (ВЛ) возможно путем их оптимизации и автоматизации проектирования, включая: создание расчетной модели ВЛ как единой сети и алгоритм ее решения; исследование нагрузок от проводов и тросов при их совместной работе с конструкциями опор в зависимости от рельефа местности и атмосферно-климатических условий; анализ напряженно-деформированного состояния токоведущих проводов, грозозащитных тросов, оттяжек, ствола опоры и фундаментов при их совместной работе; оптимизацию их конструктивных форм с учетом требований экономичности и технологичности; создание системы автоматизированного одностадийного проектирования [1–3].

### Расчетная модель воздушной линии электропередачи как единой системы

В настоящей работе разработана расчетная модель высоковольтной линии электропередачи как единой системы с учетом совместной работы конструктивных элементов и предложен алгоритм ее решения. На этой

---

основе разработана методика оптимизации опор ВЛ, а также исследованы нагрузки от токоведущих проводов и грозозащитных тросов, которые являются решающими.

Использование новой расчетной модели производим поэтапно: первый этап – расчет проводов и тросов с целью уточнения нагрузок на опоры, второй этап – расчет конструкций опор с учетом пространственной модели и уточненных нагрузок от проводов и тросов.

За модель принимается часть линии электропередачи: анкерванный участок – расстояние между смежными анкерными опорами. Для примера рассмотрим одноцепную высоковольтную линию, состоящую из двух анкерных опор и расположенного между ними  $n$ -го количества промежуточных опор, к которым подвешены три токоведущих провода и один грозозащитный трос (рис. 1).

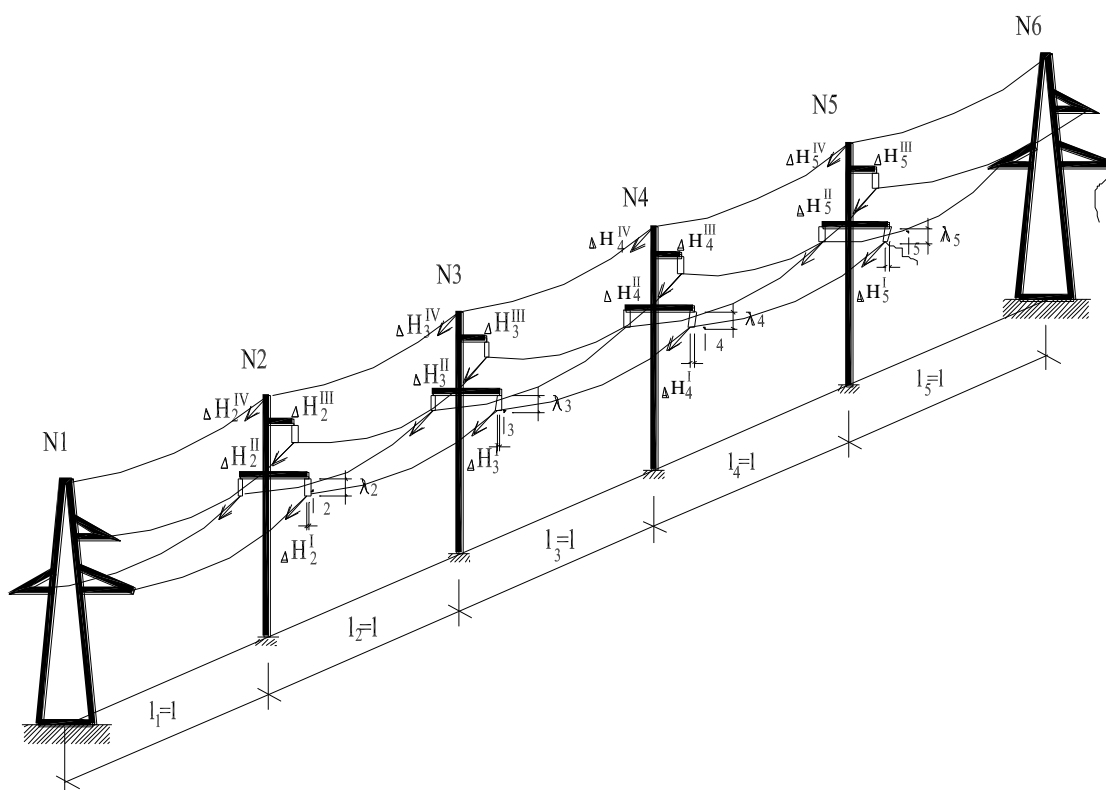


Рис. 1. – Расчетная модель воздушной линии

Провода и тросы жестко закреплены к анкерным опорам и подвержены тяжению, а к промежуточным опорам они подвешиваются свободно через промежуточный элемент – гирлянду изоляторов. На опоры действует сосредоточенная сила, образовавшаяся при обрыве провода, и равномерно распределенная нагрузка от проводов и тросов. После загрузки равновесие системы в деформированном состоянии наступит, когда деформации проводов и тросов будут равны деформациям конструкций опор.

Рассмотренные примеры показали, что редуцированное (уменьшенное) тяжение в пролете, смежном с аварийным, будет тем больше, чем дальше от анкерной опоры произошел обрыв провода.

Для расчета проводов больших переходов неприемлемы приближенные зависимости, принятые при расчетах проводов, основанные на замене цепной линии параболой.

Исследования позволили установить, что при расчетах напряжений в проводах ВЛ на ровной местности погрешность не превышает 3%, и можно пользоваться приближенной методикой, однако при определении стрел провеса и габаритов приближения провода к рангоутам судов или земле ею пренебрегать нельзя.

### **Оптимальное проектирование решетчатых конструкций**

На втором этапе рассмотрения расчетной модели исследуется напряженно-деформированное состояние металлоконструкций опор ВЛ с целью их дальнейшей оптимизации.

Задача оптимального проектирования ВЛ формулируется следующим образом. Отыскать геометрические параметры сети с варьированием координат системы и топологии при заданных сечениях с минимизацией массы или стоимости при выполнении нормативных требований и конструктивных ограничений [4, 5].

Проведенные исследования позволили предложить следующую методику применения различных математических методов и их последовательности: вначале определялся оптимальный тип решетки, затем осуществлялась оптимизация геометрических параметров нижеизложенными методами с корректировкой типа решетки комбинаторным алгоритмом.

Авторами предложен алгоритм поиска направления спуска при определении оптимальных геометрических параметров. Задается начальный многогранник, имеющий форму регулярного симплекса в  $n$ -мерном пространстве. Суть алгоритма в том, что вершина, в которой целевая функция максимальна, переносится определенным образом через вершину, в которой целевая функция минимальна. Направление поиска считалось удачным, если новое значение целевой функции оказывалось меньше максимального в исходном многограннике. В этом случае максимальная вершина заменяется на улучшенную вершину, направляющий вектор при этом сжимается в соответствии с заданным коэффициентом. При выходе за границу области допустимых значений переменных за улучшенную точку принимается точка на границе ограничений, лежащая на векторе направления переноса "улучшаемой" вершины. Если же полученное значение целевой функции превышало максимальное либо равнялось ему, то направление поиска считалось неудачным, и поиск продолжался до вершины, в которой целевая функция была максимальной без учета максимальной вершины. Если и в этом случае не достигается улучшение, то вектор переноса направляется последовательно из вершин в порядке убывания в них целевой функции. Оптимальное значение целевой функции являлось исходным значением при переходе к следующему методу оптимизации [6].

Результаты оптимизации из разных стартовых точек представлены на рисунке 2. Локальность экстремума подтверждала то, что полученные значения целевой функции мало отличались друг от друга (до 1,8% при

---

сокращенном сортаменте), а варьируемые параметры – в гораздо большей степени, причем величина целевой функции в точке оптимума меньше, чем в любой соседней. Исследуемая функция является многовариантной в области экстремума [7].

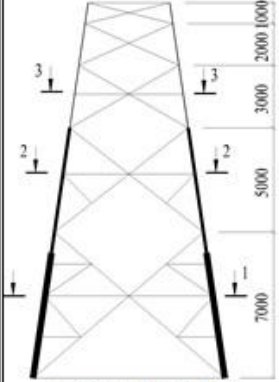

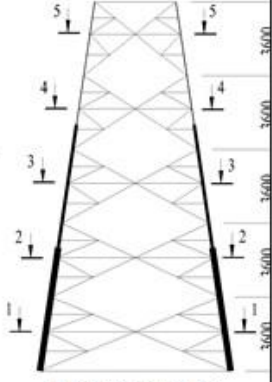

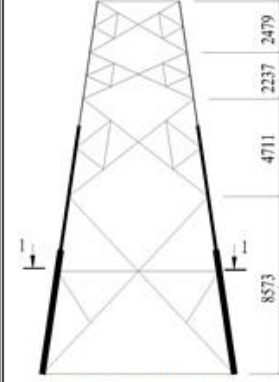
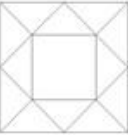
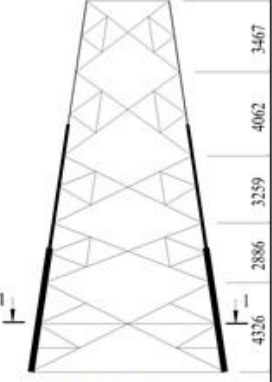

Исходная опора		Оптимальная опора	
Геометрическая схема	Тип диафрагмы	Геометрическая схема	Тип диафрагмы
 <p>Масса 10321 кг</p>	<p>1-1,2-2,3-3</p> 	 <p>Масса 8429 кг</p>	<p>1-1,2-2,3-3 4-4,5-5</p> 
 <p>Масса 10197 кг</p>	<p>1-1</p> 	 <p>Масса 8233 кг</p>	<p>1-1</p> 

Рис. 2. – Результаты оптимизации опоры У220-2+5 из разных стартовых точек

### Программный комплекс расчета проводов и тросов опор ВЛ

На основе изложенных методик в Донбасской национальной академии строительства и архитектуры разработан программный комплекс по расчёту и конструированию конструкций линий электропередачи [8, 9]. Он представляет собой систему средств автоматизированного проектирования, предназначенную для качественного проектирования оптимальных опор,

повышения производительности труда проектировщиков, снижения сроков проектирования, экономичности и надёжности проектных решений [10 – 12].

В состав комплекса входят: подсистема расчёта проводов, тросов и сбора нагрузок на опоры; подсистема расчёта и оптимизации несущих металлоконструкций опор в составе единой сети; подсистема технико-экономического анализа конструкций ВЛ; диалоговая подсистема автоматизированного конструирования металлоконструкций опор ВЛ. Он состоит из отдельных объектно-ориентированных программных блоков и универсального комплекса, работающего со специалистами в диалоговом режиме. Большинство из разработанных программ применяется при расчёте конструкций. Остальные программы служат для собственно проектирования или конструирования.

Комплекс осуществляет следующие расчёты:

- расчёт на статические силовые, температурные и деформационные воздействия токоведущих проводов, грозозащитных тросов воздушных линий с учётом многих загрузений, конструктивных ограничений и требований Правил устройства электроустановок;
  - сбор нагрузок на опору от проводов и тросов, нагрузок от действия ветра на опору и собственного веса металлоконструкций в составе единой сети ВЛ;
  - статический расчёт пространственных ферм на многие загрузения с использованием линейно-упругих конечноэлементных моделей;
  - статический расчёт вантово-стержневых систем по деформированной схеме на многие загрузения с гибкими оттяжками;
  - построение огибающей эпюр моментов и поперечных сил для ствола и траверс опор с оттяжками;
  - вычисление расчётных усилий в элементах вантово-стержневых конструкций;
-

- определение напряжений и несущей способности элементов;
- расчёт узлов, элементов и вспомогательных металлоконструкций;
- расчёт технико-экономических показателей металлоконструкций опор ВЛ;
- оптимизация параметров геометрической схемы, типа решётки и предварительного напряжения опор линий электропередачи;
- разработка рабочих чертежей на стадии КМД с учётом конструктивных ограничений и требований технологии заводского изготовления.

Подсистема расчёта проводов и тросов реализует алгоритм расчёта проводов и тросов и определение нагрузок на опоры ВЛ с учётом атмосферных условий и профиля трассы, а также сбор нагрузок от ветра на конструкцию опоры и от собственного веса металлоконструкций.

На рисунке 3 показан образец формирования файла исходных данных для расчёта провода и грозозащитного троса.

Файл включает в себя такие данные: единичная нагрузка от собственного веса, удельных вес гололёдных отложений, физико-механические характеристики провода и троса, допускаемые напряжения при среднеэксплуатационной и минимальной температурах, допускаемые напряжения при наибольшей нагрузке, коэффициенты стяжения и расщепления провода и троса в соответствии с ПУЭ.

В табличной форме вводятся следующие данные: номер анкерowanego участка, номера пролётов и опор. Для каждой опоры и пролётов указываются: длина пролёта, высота фундамента, высота от верха фундамента до нижней траверсы, высота между нижней и средней траверсами, между средней и верхней траверсами, габарит от земли до провода, разность отметок тросостойки и траверсы, длина и нормативный вес гирлянды изоляторов провода, длина и нормативный вес гирлянды

---

изоляторов троса, абсолютная отметка земли, коэффициенты гибкости опоры и распределения усилий, угол поворота трассы.

Подсистема позволяет выполнять также расчёты типовых опор для усреднённых условий, с вычислением стандартных ветровых нагрузок.

Подсистема удобна при индивидуальном проектировании новых линий электропередачи для конкретных атмосферно-климатических условий и известного профиля трассы, эффективна при реконструкции действующих линий электропередачи.

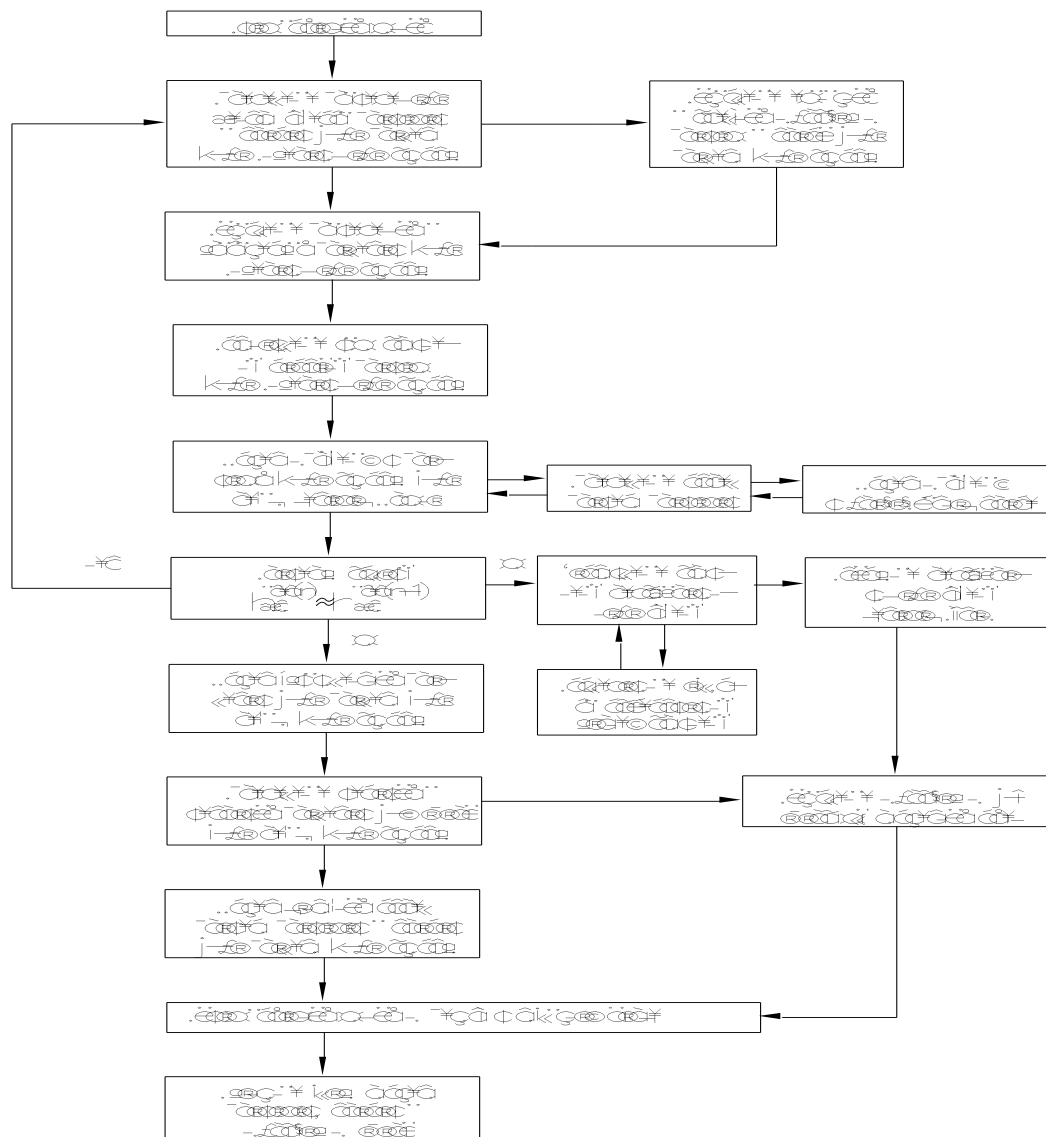


Рис. 3. – Принципиальная блок-схема вычисления напряженно-деформированного состояния проводов, тросов и нагрузок на опоры



Также разработана одностадийная система автоматизированного оптимального проектирования конструкций опор ВЛ методом моделирования в персональном компьютере. Система включает в себя твердотельное моделирование, разработку детализированных чертежей, монтажных схем и компьютерную контрольную сборку. Разработан пакет программ для создания модели опоры и формирования из нее чертежей деталей и монтажных схем [13–15].

Контрольная сборка секции опоры в виде твердотельной модели представлена на рисунке 4.

Достоверность работы пакета прикладных программ проанализирована: при перерасчете типовых опор ВЛ, при оптимизации из разных стартовых точек и достижении одного и того же оптимального проекта, при автоматизированном конструировании и изготовлении.

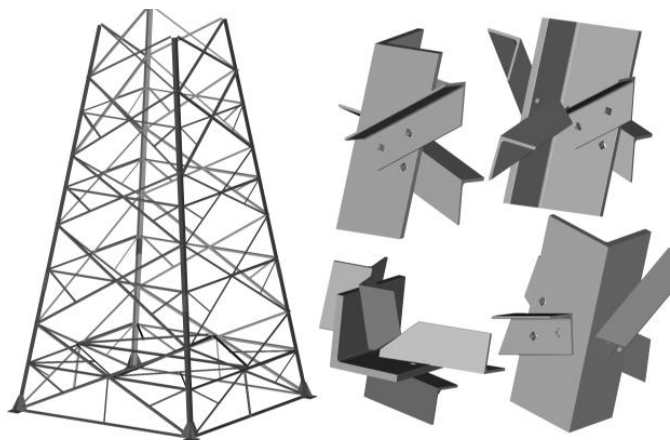


Рис. 4. – Твердотельная модель оптимальной нижней секции опоры ВЛ

### **Выводы**

1. Разработана методика оптимизации параметров геометрической схемы и типа решетки конструкций опор ВЛ, которая удовлетворяет требованиям строительных норм и правил.

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

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

5. Как показало исследование, применение для ВЛ 35–110 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.

### Литература

1. Крюков К.П., Новгородцев Б.П. Конструкции и механический расчёт линий электропередачи. Л.: Энергия, 1979. 312 с.
2. Design of Latticed Steel Transmission Structures / American Society of Civil Engineers. ANSI/ASCE 10-90. New York: ANSI, 1991. 64 p.
3. Wadell Brian C. Transmission Line Design: handbook. Norwood: Artech house, 2005. 266 p.
4. Шевченко Е. В. Совершенствование металлических конструкций опор воздушных линий электропередачи. Макеевка: ДонНАСА, 2009. 169 с.
5. Orawski G., Bradbury J., Vanner M. Overhead distribution lines – some reflections on design // Generation, Transmission and Distribution. 2019. p. 409-424.
6. Трофимов В. И. Исследование устойчивости и несущей способности металлических конструкций типа опор электропередачи. Москва: Госэнергоиздат, 1983. 320 с.
7. Правила устройства электроустановок (9-е издание). Москва: Энергоатомиздат, 2019. – 115 с.
8. IEC 60826. Design criteria of overhead transmission lines (3<sup>th</sup> edition). Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2003. 241 p.
9. Е.В. Горохов, С.Н. Шаповалов, Е.И. Удод. Повышение надежности и

- долговечности электросетевых конструкций. Киев: Техника, 2017. 284 с.
10. 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. p. 1033-1040.
  11. Pustovgar A., Tanasoglo A., Garanzha I., Shilova L., Adamtsevich A. Optimal design of lattice metal structures for overhead power lines // *MATEC Web of Conferences*. 2016. p. 19-28.
  12. Танасогло А.В. Оптимальные конструктивные решения двухцепных анкерно-угловых опор линий электропередачи 110 кВ // *Современное промышленное и гражданское строительство*. 2015. с. 5-14.
  13. Пособие по проектированию стальных конструкций опор воздушных линий (ВЛ) электропередачи и открытых распределительных устройств (ОРУ) подстанций напряжением выше 1кВ (к СНиП II-23-81\*). Москва: Центральный институт типового проектирования Энергосетьпроект Минэнерго СССР, 1989. 72 с.
  14. Егорочкина И.О., Шляхова Е.А., Черпаков А.В., Манвелян Л.А., Кучеренко Д.Ю. Алгоритм выполнения ремонтных работ по восстановлению стоек пор ЛЭП // *Инженерный вестник Дона*, 2016, №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3882](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3882)
  15. Голиков А.В., Михальчонок Е.В., Мельникова Ю.А. Анализ влияния типа решетки на распределение усилий в элементах башни // *Инженерный вестник Дона*, 2019, №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2019/5891](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2019/5891)

### References

1. Kryukov K.P., Novgorodcev B.P. *Konstrukcii i mekhanicheskij raschyot linij elektroperedachi* [Structures and mechanical calculation of transmission power lines]. L.: Energiya, 1979. 312 p.
  2. *Design of Latticed Steel Transmission Structures*. American Society of Civil Engineers. ANSI/ASCE 10-90. New York: ANSI, 1991. 64 p.
-

3. Wadell Brian C. Transmission Line Design: handbook. Norwood: Artech house, 2005. 266 p.
4. Shevchenko E. V. Sovershenstvovanie metallicheskih konstrukcij opor vozdushnyh linij elektroperedachi [Improvement of metal structures for overhead power transmission line supports]. Makeyevka: DonNASA, 2009. 169 p.
5. Orawski G., Bradbury J., Vanner M. Generation, Transmission and Distribution. 2019. p. 409-424.
6. Trofimov V. I. Issledovanie ustojchivosti i nesushchej sposobnosti metallicheskih konstrukcij tipa opor elektroperedachi [Investigation of the stability and bearing capacity of metal structures such as transmission towers]. Moskva: Gosenergoizdat, 1983. 320 p.
7. Pravila ustrojstva elektroustanovok (9-e izdanie) [Electrical installation rules (9<sup>th</sup> ed)]. Moskva: Energoatomizdat, 2019. 115 p.
8. IEC 60826. Design criteria of overhead transmissionlines. Third Edition. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2003. 241 p.
9. Gorokhov, E. V.; Shapovalov, S. N.; Udod, E. I. Povyshenie nadezhnosti i dolgovechnosti elektrosetevykh konstrukcij [Increase of reliability and durability of electric grid structures]. Kyiv: Tekhnika, 2007. 284 p.
10. Shevchenko Ye., Nazim Ya., Tanasoglo A., Garanzha I. Procedia Engineering. 2015. p. 1033-1040.
11. Pustovgar A., Tanasoglo A., Garanzha I., Shilova L., Adamtsevich A. MATEC Web of Conferences. 2016. p. 19-28.
12. Tanasoglo A.V. Sovremennoe promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2015. p. 5-14.
13. Posobie po proektirovaniyu stal'nykh konstrukcij opor vozdushnykh linij (VL) elektroperedachi i otkrytykh raspredelitel'nykh ustrojstv (ORU) podstancij napryazheniem vyshe 1kV (k SNiP II-23-81\*) [Textbook on design of steel constructions of air power transmission line supports and open distribution system



of electric power substation with electric potential more than 1 kilovolt (SNiP II-23-81\*)]. Moskva: General institute of standard design, 1989. 72 p.

14. Egorochkina I.O., Shlyahova E.A., Cherpakov A.V., Manvelyan L.A., Kucherenko D.Yu. Inzhenernyj vestnik Dona, 2016, №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3882](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3882)

15. Golikov A.V., Mihal'chonok E.V., Mel'nikova YU.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2019, №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2019/5891](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2019/5891)