

УДК 621.315.1:624.014

А. В. ТАНАСОГЛО, С. Н. БАКАЕВ, С. А. ФОМЕНКО, А. Н. ОРЖЕХОВСКИЙ, Л. В. КОЗЛОВА

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

ИССЛЕДОВАНИЕ АВАРИЙНОГО ТЯЖЕНИЯ ТОКОВЕДУЩИХ ПРОВОДОВ ОПОР ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Аннотация. В данной статье целью ставится разработка численно-аналитического способа решения задачи об определении тяжения провода после его обрыва. Решение данной задачи реализуется в программном комплексе MS «Excel». В качестве модели принимается часть воздушной линии (ВЛ) электропередачи – анкерванный участок. Обрыв провода моделируется поочередно в каждом из одиннадцати пролетов. Опоры рассматриваются как составные части всей конструкционной системы электрической сети. Уделено внимание гибкости опор ВЛ. Установлено, что гибкие опоры отклоняются в сторону уцелевшего провода под воздействием его тяжения, и к перемещению точки подвеса вследствие отклонения гирлянды добавляется еще и прогиб опоры. На основании расчета и обобщения результатов выявлена зависимость величины редуцированного тяжения от количества последующих пролетов анкерванного участка с уцелевшим проводом. Определено количество пролетов, необходимое для нахождения максимальной величины редуцированного тяжения.

Ключевые слова: воздушная линия электропередачи, редуцированное тяжение, пространственная модель, опора ВЛ, система уравнений, расчетные нагрузки.

ВВЕДЕНИЕ

В ПУЭ [1] установлены наименьшие расстояния по вертикали от проводов воздушной линии до пересекаемых сооружений, например до проводов контактной сети трамвайных и троллейбусных линий, которые должны быть выдержаны при обрыве провода в смежном пролете, если он подвешен в глухих зажимах на поддерживающих гирляндах.

Изменение тяжения провода в результате смещения его точки подвеса называется редуцией, а установившееся новое тяжение – редуцированным [2]. Редуцированное тяжение провода необходимо вычислять для того, чтобы знать, во-первых, нагрузку на промежуточную опору при аварийном режиме и, во-вторых, как фактор, влияющий на величину стрелы провеса, на габарит от провода до земли или какого-либо пересекаемого линией объекта [3]. Определение тяжения в уцелевшем проводе требуется также для расчета промежуточных опор больших переходов.

РЕДУЦИРОВАННОЕ ТЯЖЕНИЕ

При эксплуатации линии электропередачи возможны нормальные режимы работы и особые режимы при обрыве проводов и тросов, т. е. аварийные [4, 5].

Расчет провода при аварийном состоянии линии электропередачи производится с целью установления величины тяжения и провеса провода в пролете, смежном с аварийным.

В данной статье будут рассмотрены случаи обрыва провода в пролете, который ограничен с одной стороны анкерной опорой, а с другой – промежуточной опорой или ограничен с двух сторон промежуточными опорами. За расчетную модель принимается часть ВЛ: анкерванный участок – участок между смежными анкерными опорами, состоящий из двух анкерных опор и расположенных между ними 10 промежуточных опор, к которым подвешены три токоведущих провода и один грозозащитный трос.

При обрыве провода на промежуточную опору передается горизонтальная сила от тяжения уцелевшей части провода. Если провод подвешен на поддерживающей гирлянде изоляторов, то гирлянда

отклоняется в направлении действия одностороннего тяжения до положения, при котором наступит равновесие всех приложенных к ней внешних сил. При этом произойдет ослабление тяжения провода [6].

Следует отметить, что длина гирлянды изоляторов оказывает большое влияние на редуцированное тяжение. Чем длиннее гирлянда, тем больше ее отклонение и тем меньше редуцированное тяжение провода. Такое тяжение возникает только при подвеске проводов в глухих зажимах. При выпадающих зажимах провод сбрасывается на землю, а при зажимах ограниченной прочности заделки он проскальзывает в зажиме, и его тяжение уменьшается до 600...800 кгс [7–9].

Кроме того, на редуцированное тяжение влияет длина пролета: чем больше пролет, тем меньше доля его изменения вследствие отклонения гирлянды. Поэтому при увеличении пролета значение редуцированного тяжения возрастает.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ТЯЖЕНИЯ ПРОВОДА ПОСЛЕ ОБРЫВА

Постановка задачи

Пусть обрыв провода произошел в N-ом пролете, считая от анкерной опоры. Пролет, в котором произошел обрыв, всегда имеет номер 1. Смежный с аварийным уцелевший пролет имеет номер 2. Далее пролеты нумеруются в возрастающем порядке вплоть до анкерной опоры (рисунок).

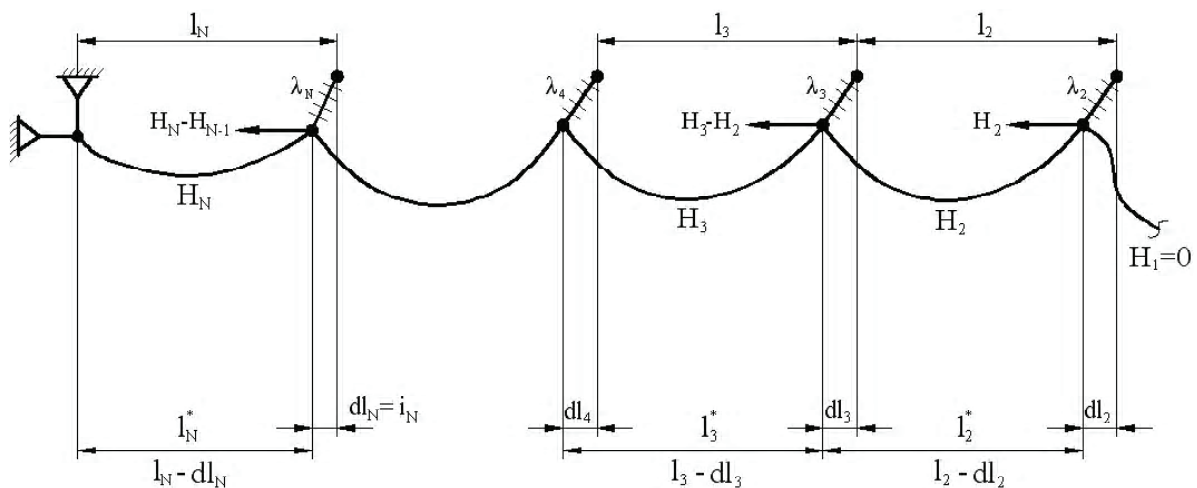


Рисунок – Случай обрыва провода в N-ом пролете от анкерной опоры.

Принятые обозначения: l_i – длина i-го пролета (м); l_i^* – длина i-го пролета после обрыва провода (м); p_i – погонный вес провода в i-ом пролете (кг/м); A_i – площадь поперечного сечения провода в i-ом пролете (м²); E_i – модуль Юнга провода в i-ом пролете (кг/м²); λ_i – длина правой гирлянды в i-ом пролете (м); G_i – вес правой гирлянды в i-ом пролете (кг); k_i – коэффициент податливости i-ой опоры (м/кг); dl_i – отклонение правой гирлянды в i-ом пролете после обрыва провода (м); dO_i – отклонение точки подвеса гирлянды, вызванное деформацией i-ой опоры; H_{0i} – известное тяжение провода в i-ом пролете до обрыва провода (кг); H_i – искомое тяжение провода в i-ом пролете после обрыва провода (кг).

Основные соотношения

1. Изменение длин пролетов, вызванное перемещением точек подвеса в результате упругой деформации провода (изменение длины пролета dl_i):

$$F_{in}(H_i) = dl_i = \frac{l_i}{E_i \cdot A_i} (H_{0i} - H_i) + \frac{p_i^2 \cdot l_i^3}{24} \left(\frac{1}{H_i^2} - \frac{1}{H_{0i}^2} \right) \quad (i = 2, 3, \dots, N) \quad (1)$$

2. Отклонения гирлянд, полученные из условия их статического равновесия после обрыва:

$$dl_i = i_i = F_{ir}(H_{i-1}, H_i) = \frac{\lambda_i}{\sqrt{1 + 0,25 \cdot \left(\frac{p_{i-1} \cdot l_{i-1} + p_i \cdot l_i + G_i}{H_i - H_{i-1}} \right)^2}} \quad (i = 3, \dots, N) \quad (2)$$

Для $N > 3$ (обрыв провода в четвертом и следующих пролетах от анкерной опоры) система нелинейных уравнений имеет следующий вид:

$$\begin{cases} F_2(H_2, H_3) = F_{2n}(H_2) - F_{2r}(H_2) - k_2 \cdot H_2 + F_{3r}(H_2, H_3) + k_3 \cdot (H_3 - H_2) = 0 \dots \\ F_i(H_{i-1}, H_i, H_{i+1}) = F_{in}(H_i) - F_{ir}(H_{i-1}, H_i) - k_i \cdot (H_i - H_{i-1} + F_{i+1r}(H_i, H_{i+1}) + \\ + k_{i+1} \cdot (H_{i+1} - H_i) = 0 \\ F_N(H_{N-1}, H_N) = F_{Nn}(H_N) - F_{Nr}(H_{N-1}, H_N) - k_N \cdot (H_N - H_{N-1}) = 0, \end{cases} \quad (3)$$

где $i = 3, \dots, N-1$.

Указанная система уравнений является однопараметрической в том смысле, что по значению тяжения провода в пролете с анкерной опорой (H_N) или в пролете, смежном с аварийным (H_2), можно вычислить значения тяжения во всех остальных пролетах.

Алгоритм решения задачи

1. Методом половинного деления относительно H_N определяются тяжения провода H_2, \dots, H_N для случая жестких опор ($k_i = 0$).

2. Для гибких опор ($k_i \neq 0$) система нелинейных уравнений решается методом наименьших квадратов, суть которого состоит в поиске стандартными методами (метод Ньютона, метод сопряженных градиентов) минимума суммы квадратов $F_2^2 + F_3^2 + \dots + F_N^2$. При этом в качестве начального приближения выбираются значения H_2, \dots, H_N (искомые тяжения проводов при обрыве), полученные на предыдущем шаге.

При вычислении стрел провеса провода в уцелевших пролетах учитываются новые значения длин пролетов l_i^* . Расчет редуцированного тяжения провода при его обрыве выполняется для одиннадцати пролетов, считая от анкерной опоры.

Все расчеты выполняются в вычислительном комплексе MS «Excel».

В таблице приведены редуцированные тяжения токоведущего провода АС 240/32 для пролета $l = 300$ м в зависимости от количества уцелевших пролетов M до анкерной опоры (в кг и в процентном отношении к начальному тяжению).

Таблица – Значение тяжений с учетом гибкости опор

M	Редуцированные тяжения									
	H ₂	H ₃	H ₄	H ₅	H ₆	H ₇	H ₈	H ₉	H ₁₀	H ₁₁
1	933,4427									
	47,97 %									
2	1 285,195	1 364,36								
	66,04 %	70,11 %								
3	1 415,396	1 532,55	1 575,858							
	72,73 %	78,75 %	80,98 %							
4	1 468,202	1 605,44	1 669,211	1 696,907						
	75,45 %	82,50 %	85,78 %	87,20 %						
5	1 491,532	1 639,082	1 713,206	1 754,357	1 773,138					
	76,65 %	84,23 %	88,04 %	90,15 %	91,12 %					
6	1 502,515	1 655,288	1 734,671	1 782,649	1 810,784	1 823,89				
	77,21 %	85,06 %	89,14 %	91,61 %	93,05 %	93,73 %				
7	1 525,925	1 675,938	1 757,53	1 810,217	1 845,755	1 869,736	1 885,312			
	78,41 %	86,12 %	90,32 %	93,02 %	94,85 %	96,08 %	96,88 %			
8	1 576,812	1 702,12	1 774,48	1 821,686	1 853,308	1 874,094	1 886,724	1 892,696		
	81,03 %	87,47 %	91,19 %	93,61 %	95,24 %	96,30 %	96,95 %	97,26 %		
9	1 577,888	1 703,643	1 776,577	1 824,58	1 857,326	1 879,693	1 894,53	1 903,587	1 907,877	
	81,08 %	87,55 %	91,29 %	93,76 %	95,44 %	96,59 %	97,36 %	97,82 %	98,04 %	
10	1 578,357	1 704,334	1 777,557	1 825,967	1 859,287	1 882,465	1 898,446	1 909,099	1 915,616	1 918,708
	81,11 %	87,58 %	91,34 %	93,83 %	95,54 %	96,74 %	97,56 %	98,10 %	98,44 %	98,60 %

ВЫВОДЫ

1. Редуцированное тяжение в пролете, смежном с аварийным, будет тем больше, чем дальше от анкерной опоры произошел обрыв провода.
2. Когда число уцелевших пролетов составляет 4 и более, то можно не учитывать гибкость опор, считая их абсолютно жесткими.
3. Увеличение редуцированного тяжения не происходит пропорционально количеству пролетов, в которых сохранился провод, т. к. уменьшается отклонение гирлянд на каждой последующей опоре и процесс начинает затухать.
4. Влияние жесткого закрепления провода на анкерной опоре распространяется лишь на ближайšie два пролета.
5. Для определения максимальной величины редуцированного тяжения допустимо решать задачу с семью пролетами в анкерном участке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила улаштування електроустановок. Глава 2.5 «Повітряні лінії електропередавання напругою вище 1 кВ до 750 кВ» [Текст] / Міністерство палива та енергетики України. – К. : ОЕП «ГРІФРЕ», 2006. – 125 с. – (Нормативний документ Мінпаливенерго України).
2. Крюков, К. П. Конструкции и механический расчёт линий электропередачи [Текст] / К. П. Крюков, Б. П. Новгородцев. – [2-е изд.]. – Л. : Энергия, 1979. – 312 с.
3. Шевченко, Е. В. Совершенствование металлических конструкций опор воздушных линий электропередачи [Текст] : монография / Е. В. Шевченко. – [2-е изд.]. – Макеевка : ДонГАСА, 1999. – 169 с.
4. Танасогло, А. В. Численно-аналитическая методика решения задачи устойчивости пространственных решетчатых конструкций [Текст] / А. В. Танасогло // Металлические конструкции. – 2015. – Т. 21, № 3. – С. 107–117.
5. Оптимальное проектирование решетчатых металлических конструкций воздушных линий электропередачи [Текст] / А. П. Пустогвар, А. В. Танасогло, И. М. Гаранжа, Л. А. Шилова и др. // MATEC Web of Conferences. – 2016. – № 86, 04003(2016). – P. 19–28.
6. Танасогло, А. В. Оптимальные конструктивные решения двухцепных анкерно-угловых опор линий электропередачи 110 кВ [Текст] / А. В. Танасогло // Современное промышленное и гражданское строительство. – 2015. – Т. 11, № 1. – С. 5–14.
7. Spillers, W. R. Iterative design for optimal geometry [Текст] / W. R. Spillers // J. of Str. Div., ASCE. – 2011. – V. 101. – P. 1435–1442.
8. Refinement of wind loads on lattice support structures of the intersystem overhead power transmission lines 750 kV [Text] / Ye. Shevchenko, Ya. Nazim, A. Tanasoglo, I. Garanzha // Procedia Engineering, 2015. – 117. – P. 1033–1040.
9. Танасогло, А. В. Уточнение коэффициента динамичности анкерно-угловой опоры ВЛ 110 кВ при действии пульсационной составляющей ветровой нагрузки [Текст] / А. В. Танасогло // Металеві конструкції. – 2012. – Т. 18, № 2. – С. 135–145.

Получена 03.04.2020

А. В. ТАНАСОГЛО, С. М. БАКАЄВ, С. О. ФОМЕНКО, А. М. ОРЖЕХОВСЬКИЙ,
Л. В. КОЗЛОВА
ДОСЛІДЖЕННЯ АВАРІЙНОГО ТЯЖІННЯ СТРУМОВЕДУЧИХ ПРОВОДІВ
ОПОР ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ
ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

Анотація. У даній статті за мету ставиться розробка чисельно-аналітичного способу вирішення задачі про визначення тяжіння проводу після його обривання. Розв'язання даної задачі реалізується в програмному комплексі MS «Excel». За модель приймається частина повітряної лінії (ПЛ) електропередачі – анкерована ділянка. Обривання проводу моделюється по черзі в кожному з одинадцяти прольотів. Опори розглядаються як складові частини всієї конструкційної системи електричної мережі. Приділено увагу гнучкості опор ПЛ. Установлено, що гнучкі опори відхиляються вбік уцілілого проводу під впливом його тяжіння і до переміщення точки підвісу внаслідок відхилення гирлянди додається ще й прогин опори. На підставі розрахунку й узагальнення результатів виявлена залежність величини редукованого тяжіння від кількості наступних прольотів анкерованої ділянки з уцілілим проводом. Визначена кількість прольотів, необхідна для знаходження максимальної величини редукованого тяжіння.

Ключові слова: повітряна лінія електропередачі, редуковане тяжіння, просторова модель, опора ПЛ, система рівнянь, розрахункові навантаження.

ANTON TANASOGLO, SERGII BAKAYEV, SERAFIM FOMENKO, ANATOLY ORZHEKHOVSKY, LYUDMILA KOZLOVA
INVESTIGATION OF EMERGENCY TENSION OF ELECTRICAL CARRYING CONDUCTORS OF OVERHEAD POWER LINE SUPPORTS
Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

Abstract. The purpose of the paper is the development of the numerical and analytical method of problem solution of the conductor tension determination after its breakage. The solution of the problem is realized in software package MS «Excel». The model section of the overhead power line (OPL) – an anchor site. The conductor breakage is simulated in turn in each of eleven spans. The supports are considered to be the components of the whole structural system of the electrical network. The flexibility of the OPL supports has been given consideration. It was established that flexible supports get out of plumb of the remained conductor because of its tension and to the suspension point displacement after an insulator string deviation there is also the support sag. On the basis of the design and integration of the results, the relationship of the reduced tension value of the amount of the following spans of the anchor section with the remained conductor has been determined. The amount of spans necessary for finding of the maximum reduced tension value has been revealed.

Key words: overhead power line, reduced tension, three-dimensional model, OPL support, set system of equations, design loads.

Танасогло Антон Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры металлических конструкций и сооружений ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: эксплуатационная надежность и оптимальное проектирование конструкций воздушных линий электропередачи и антенных опор. Изучение действительной работы металлических решетчатых конструкций башенного типа.

Бакаев Сергей Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры металлических конструкций и сооружений ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: обеспечение надежной работы и долговечности конструкций опор воздушных линий, порталов и стоек под оборудование открытых распределительных устройств электрических подстанций в условиях повышения мощностей энергопотребления и с учетом условий и различий их эксплуатации, проектирования конструкций с гарантированными показателями долговечности.

Фоменко Серафим Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и прикладной механики ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: развитие общей методики динамических расчетов элементов строительных конструкций и поиск рациональных способов гашения колебаний.

Оржеховский Анатолий Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и прикладной механики ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: исследование действительной работы и показателей надежности стержневых систем в строительстве, численные методы расчета пространственных стержневых конструкций.

Козлова Людмила Викторовна – кандидат экономических наук, доцент кафедры экономики, экспертизы и управления недвижимостью ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: мониторинг социально-экономического развития муниципальных образований. Экономическая и социальная среда функционирования объектов недвижимости.

Танасогло Антон Володимирович – кандидат технічних наук, доцент кафедри металевих конструкцій і споруд ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: експлуатаційна надійність та оптимальне проектування конструкцій повітряних ліній електропередачі та антенних опор. Вивчення дійсної роботи металевих ґратчастих конструкцій баштового типу.

Бакаєв Сергій Миколайович – кандидат технічних наук, доцент кафедри металевих конструкцій і споруд ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: забезпечення надійної роботи і довговічності конструкцій опор повітряних ліній, порталів і стійок під обладнання відкритих розподільчих пристроїв електричних підстанцій в умовах підвищення потужностей енергоспоживання та з урахуванням умов і відмінностей їх експлуатації, проектування конструкцій з гарантованими показниками довговічності.

Фоменко Серафим Олександрович – кандидат технічних наук, доцент кафедри теоретичної та прикладної механіки ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: розвиток загальної методики динамічних розрахунків елементів будівельних конструкцій і пошук раціональних способів гасіння коливань.

Оржеховський Анатолій Миколайович – кандидат технічних наук, доцент кафедри теоретичної та прикладної механіки ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: дослідження

дійсної роботи і показників надійності стержневих систем в будівництві, чисельні методи розрахунку просторових стержневих конструкцій.

Козлова Людмила Вікторівна – кандидат економічних наук, доцент кафедри економіки, експертизи та управління нерухомістю ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: моніторинг соціально-економічного розвитку муніципальних утворень. Економічне і соціальне середовище функціонування об'єктів нерухомості.

Tanasoglo Anton – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Metal Structures and Constructions Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: operational reliability and optimal design of overhead power transmission line and antenna support structures. Studying of the valid work of metal lattice tower supports.

Bakayev Sergii – Ph. D. (Eng.), Associate Professor; Metal Structures and Constructions Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: reliable operation supply and durability of the transmission line supports structures, portal frames and pillars underneath the equipment of outdoor switchgears of electric substation in terms of the power consumption stepping up and with regards to the conditions and distinctions of their operation, structural designing work with the guarantee indices of durability.

Fomenko Serafim – Ph. D. (Eng.), Associate Professor; Theoretical and Applied Mechanics Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: development of the general dynamic design technique of building structure elements and search for the rational ways of vibration damping.

Orzhekhovsky Anatoly – Ph. D.(Eng.), Associate Professor, Theoretical and Applied Mechanics Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: the study of real work and reliability indicators of pivotal systems in construction, numerical methods for calculating spatial pivotal structures.

Kozlova Lyudmila – Ph. D. (Econ.), Associate Professor, Economics, Expertise and Property Management Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: monitoring of socio-economic development of municipalities. Economic and social environment of real estate objects functioning.