

УДК 621.315.17

ГАБАРИТНИЙ ПРОЛІТ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

О. Ю. Кімстач, кандидат технічних наук, доцент

С. М. Новогрецький, кандидат технічних наук, доцент

В. Є. Мілев, студент

Національний університет кораблебудування імені адмірала
Макарова

Розглянуто питання визначення за допомогою апроксимуючих функцій довжин габаритних прольотів повітряних ліній електропостачання, які будуються на основі залізобетонних, композиційних, металевих решітчастих та багатогранних опор. Довжина габаритного прольоту визначається за допомогою неперервних функцій, що надає можливість виконати пошук її для будь-якої комбінації вихідних умов та застосовувати її у алгоритмах автоматизованих комплексів проектування систем електропостачання.

Ключові слова: повітряна лінія електропостачання, габаритний проліт, стріла провису, апроксимація, неперервна функція.

Постановка проблеми. Технічний прогрес обумовив необхідність розвитку систем електропостачання, основною складовою котрих є повітряні лінії (ПЛ). Вони відрізняються відносно добрими показниками ефективності та великим строком служби. Однак бурний та іноді неконтрольований розвиток ліній електропостачання (ЛЕП) призвів до необхідності перегляду схем систем електропостачання. А будівництво нових ЛЕП виконується з урахуванням оптимізаційних алгоритмів для отримання найвищих показників ефективності [1]. Всі ці фактори вимагають виконання розрахунків, які потребують наявності основних геометричних параметрів ПЛ, серед яких одним з найважливіших є габаритний проліт.

Аналіз актуальних досліджень. Габаритний проліт у більшості випадків використовується як основний параметр для розрахунку інших геометричних співвідношень або як не-

© Кімстач О.Ю., Новогрецький С.М., Мілев В.Є., 2018

залежна змінна при отриманні різноманітних порівняльних характеристик.

Завдання визначення технічних показників ПЛ за допомогою значення габаритного прольоту складаються з: розрахунку коливань та галопування дротів при складних погодних умовах [2]; вимірювання та розрахунку стріли провисання при температурних коливаннях [3]; розрахунку температури дроту за геометричними параметрами ПЛ [4]; визначення оптимального натягу дротів за умовами забезпечення припустимої стріли провису [5] та ін.

Визначення габаритного прольоту звичайно виконується на підставі розрахунку критичних прольотів [6] за умовами припустимих механічних навантажень у дротах за різних погодних умов та електричному навантаженні ЛЕП [7, 8]. Але подібна методика потребує використання великої кількості коефіцієнтів, які задаються у табличній формі, та виконання складних розрахунків з використанням графічних способів пошуку невідомої величини.

Частково завдання усунення коефіцієнтів, які задані у табличній формі, вирішено у [8], але запропоновані функції мають достатньо великі похибки та обмеження застосування у межах кліматичних регіонів лише України, які відповідають лише першим трьом-чотирьом регіонам за [7].

Взагалі наявність габаритного прольоту надає можливість виконати порівняльний аналіз схем електроенергетичних систем [1], механічних навантажень у дротах [9], економічних показників ПЛ [10] та ін.

Іноді габаритний проліт є відомою величиною, а за її значенням необхідно розрахувати максимальний припустимий перетин дротів. Таке завдання виникає при модернізації існуючих ПЛ [11].

Незначні похибки при розрахунку габаритного прольоту припустимі тому, що відповідно [7, 8] припустимі механічні навантаження на дроти при найгірших умовах експлуатації ПЛ приймаються із запасом у декілька разів, але в окремих випадках ігнорування вірогідності збігу всіх найгірших погодних та технічних умов може призвести до тяжких аварій [12].

Таким чином, габаритний проліт – найважливіший параметр ПЛ, якій бажано отримати за найпростішою методикою з невеликою похибкою.

Мета статті – визначення габаритного прольоту ПЛ за допомогою безперервних функцій.

Виклад основного матеріалу. Поставлене завдання вирішується шляхом переходу від дискретних функцій до безперервних.

Нормативне вітрове навантаження на дроти та троси, що діє перпендикулярно їм [7], Н

$$P'_w = \alpha_w k_l k_w c_x W F, \quad (1)$$

де α_w – коефіцієнт, що враховує нерівномірність вітрового тиску; k_l – коефіцієнт, що враховує вплив довжини прольоту на вітрове навантаження; k_w – коефіцієнт, що враховує зміну вітрового тиску за висотою залежно від типу місцевості; c_x – коефіцієнт лобового опору; W – нормативний вітровий тиск, Па; F – площа подовжнього діаметрального перетину дроту (тросу), м².

Наближено без урахування збільшення довжини дроту за рахунок наявності стріли провису (похибка у більшості випадків не перевищує 5%) площа подовжнього діаметрального перетину дроту, м²

$$F = (d + 2k_i k_d b_R) l \cdot 10^{-3}, \quad (2)$$

де k_i і k_d – коефіцієнт, що враховує зміну товщини стінки ожеледдю залежно від висоти та діаметру дроту (тросу); b_R – умовна товщина стінки ожеледдю, мм; d – діаметр дроту (тросу), мм; l – довжина габаритного прольоту (рис. 1), м.

Нормативне лінійне навантаження ожеледям на 1 м дроту або тросу [7], Н/м

$$P'_R = \pi k_i k_d b_R (d + k_i k_d b_R) g \rho \cdot 10^{-3}, \quad (3)$$

де g – прискорення вільного падіння, дорівнює 9,8 м/с²; ρ – щільність льоду, дорівнює 0,9 г/см³.

Розрахункове вітрове навантаження за умовами механічного розрахунку дротів і тросів [7], Н

$$P_w = P'_w \gamma_{pw} \gamma_{ww} \gamma_{fw} \text{ ,} \quad (4)$$

де γ_{pw} – регіональний коефіцієнт для вітрового навантаження, що приймається від 1,0 до 1,3 у відповідності з досвідом експлуатації ЛЕП у відповідному регіоні (у загальному випадку дорівнює 1,0); γ_{ww} – коефіцієнт надійності за відповідальністю; γ_{fw} – коефіцієнт надійності за вітровим навантаженням, дорівнює 1,1.

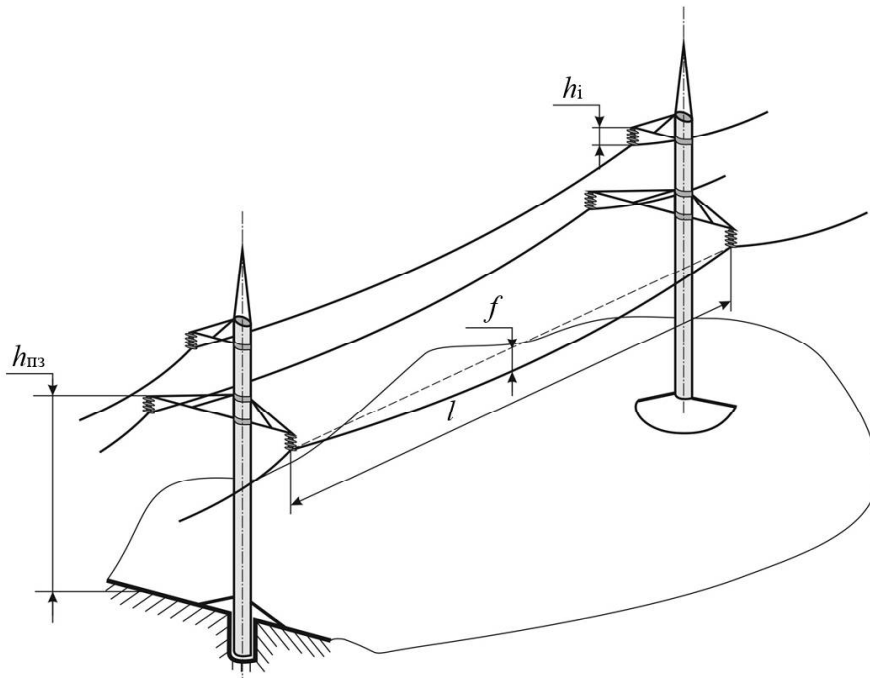


Рис. 1. Основні геометричні розміри повітряної лінії

Розрахункове лінійне навантаження ожеледям за умовами механічного розрахунку дротів і тросів [7], Н/м

$$P_R = P'_R \gamma_{pR} \gamma_{wR} \gamma_{fR} \gamma_c \text{ ,} \quad (5)$$

де γ_{pR} – регіональний коефіцієнт для навантаження ожеледям, що приймається від 1,0 до 1,5 згідно з досвідом експлуатації ЛЕП у відповідному регіоні (у загальному випадку дорівнює 1,0); γ_{wR} – коефіцієнт надійності за відповідальністю; γ_{fR} – коефіцієнт надійності за навантаженням ожеледям; γ_c – коефіцієнт умов роботи, що дорівнює 0,5.

Розрахункове лінійне навантаження від маси дроту або тросу, Н/м

$$P_m = 1,05 \cdot 10^{-3} mg \text{ ,} \quad (6)$$

де m – маса дроту або тросу без змащення на одиницю довжини, кг/км.

З метою спрощення побудови алгоритму розрахунку габаритного прольоту ПЛ багаточисельні коефіцієнти рівнянь (1)-(5), які задаються у табличній формі, пропонується апроксимувати за допомогою неперервних функцій.

Коефіцієнт, що враховує нерівномірність вітрового тиску, апроксимується функцією залежно від вітрового регіону R_w

$$\alpha_w(R_w) = 0,685 - \frac{0,075}{1 - 2R_w}. \quad (7)$$

Коефіцієнт, що враховує вплив довжини прольоту на вітрове навантаження апроксимується функцією залежно від довжини прольоту l

$$k_l(l) = 0,9 + \frac{30}{50 + l}. \quad (8)$$

Нормативний вітровий тиск апроксимується функцією залежно від вітрового регіону R_w , Па

$$W(R_w) = 15R_w^2 + 65R_w + 320. \quad (9)$$

Коефіцієнт, що враховує зміну товщини стінки ожеледдю апроксимується функцією залежно від діаметру дроту (тросу) d

$$k_d(d) = 0,2 + \frac{48}{50 + d}. \quad (10)$$

Умовна товщина стінки ожеледдю апроксимується функцією залежно від регіону за ожеледям R_R , мм

$$b_R(R_R) = 5R_R + 5. \quad (11)$$

Коефіцієнт, що враховує зміну вітрового тиску за висотою, апроксимується функцією залежно від висоти найнижчої точки підвісу на опорі $h_{пз}$

$$k_w(h_{пз}) = 0,57 \ln \left(h_{пз} + 15 + \sqrt{(h_{пз} + 15)^2 + 30} \right) - 0,957. \quad (12)$$

Коефіцієнт лобового опору апроксимується функцією залежно від діаметру дроту d

$$c_x(d) = 1,1 + \frac{0,1}{\pi} \operatorname{arccctg}[100(d - 20)]. \quad (13)$$

Коефіцієнт, що враховує зміну товщини стінки ожеледдю узалежно від висоти кріплення дроту, апроксимується функцією залежно від висоти найнижчої точки підвісу на опорі $h_{\text{пз}}$

$$k_i(h_{\text{пз}}) = 0,23 + 0,35 \ln \left(h_{\text{пз}} - 16 + \sqrt{(h_{\text{пз}} - 25)^2} \right). \quad (14)$$

Коефіцієнт надійності за відповідальністю для вітрового навантаження апроксимується функцією залежно від напруги ЛЕП U

$$\gamma_{\text{wv}}(U) = 1,1 + \frac{0,1}{\pi} \operatorname{arccctg}[100(U - 240)]. \quad (15)$$

Коефіцієнт надійності за відповідальністю для навантаження ожеледям апроксимується функцією залежно від напруги ЛЕП U

$$\gamma_{\text{wR}}(U) = 1,3 + \frac{0,3}{\pi} \operatorname{arccctg}[100(U - 240)]. \quad (16)$$

Коефіцієнт надійності за навантаженням ожеледям апроксимується функцією залежно від регіону за ожеледям R_R

$$\gamma_{\text{fR}}(R_R) = 1,6 - \frac{0,3}{\pi} \operatorname{arccctg}[10^{R_R} - 200]. \quad (17)$$

Кліматичні регіони за вітром та ожеледдю у наведеному алгоритмі прийняті за Правилами [7], тобто згідно з кліматичними картами Росії, які мають більшість характерних регіонів від субтропічних до арктичних, що надає можливість застосувати розроблену методику як в Україні, так і в інших країнах світу. Для адаптації номерів кліматичних регіонів України за [8] до відповідних за [7] необхідно застосувати табл. 1.

Таблиця 1

Узгодження кліматичних регіонів України та Росії

Регіон за вітром		Регіон за ожеледдю	
Україна	Росія	Україна	Росія
1	1	1	1,4
2	1,6	2	2,2
3	2	3	2,8
4	2,34	4	3,4
5	2,67	5	4,6
		6	5,8

Для аналізу механічної стійкості дроту або тросу слід розглянути найбільш важкі умови експлуатації – наявність ожеледі та вітру [13]. Для цього визначаються відповідні механічні навантаження, в рекомендаціях [7, 8] вважається, що при максимальній ожеледі вітровий тиск складає лише чверть нормованої величини, але у сукупності з додатковими умовами та згідно з досвідом експлуатації це не так [12]. Тому вітровий тиск при ожеледі приймається рівним нормованій величини, що помножена на коефіцієнт повітря при ожеледі k_{wR} .

Коефіцієнт k_{wR} для всіх типів опор повинен знаходитися у діапазоні від 0,25 до 1,0. Для окремих типів опор доцільно використовувати наступні значення k_{wR} :

- для залізобетонних – 0,7...1,0 (менші значення відповідають меншим перетинам дротів);

- для залізних решітчастих – 0,4...1,0 (менші значення відповідають меншим перетинам дротів);

- для залізних багатогранних та композитних – 1,0.

Після підстановки (1), (2), (7)-(15) у формулу (4) розрахункове вітрове навантаження за умовами механічного розрахунку дротів і тросів залежно від довжини габаритного прольоту l , Н

$$P_w(l) = k_{wR} A \left(0,9 + \frac{30}{50 + l} \right) l, \quad (18)$$

де узагальнений коефіцієнт вітрового навантаження, Н / м

$$A = \alpha_w(R_w)k_w(h_{пз})c_x(d)W(R_w)[d + 2k_i(h_{пз})k_d(d)b_R(R_R)]\gamma_{pw}\gamma_{ww}(U)\gamma_{fw} \cdot 10^{-3}. \quad (19)$$

Після підстановки (3), (10), (11), (14), (16) і (17) у формулу (5) розрахункове навантаження ожеледдю за умовами механічного розрахунку дротів і тросів залежно від довжини габаритного прольоту l , Н

$$P_R(l) = Bl, \quad (20)$$

де узагальнений коефіцієнт навантаження ожеледям, Н/м

$$B = \pi k_i(h_{пз})k_d(d)b_R(R_R)[d + k_i(h_{пз})k_d(d)b_R(R_R)]g\rho\gamma_{pR}\gamma_{wR}(U)\gamma_{fR}(R_R)\gamma_c \cdot 10^{-3}. \quad (21)$$

Найменший припустимий габарит для ПЛ поза населеними пунктами апроксимується функцією залежно від напруги U , м

$$h_{\min}(U) = 1,9 + 0,9 \ln\left(U - 18 + \sqrt{(U - 112)^2}\right). \quad (22)$$

З урахуванням (22) стріла провису у середині прольоту (рис. 1), м

$$f = h_{пз} - h_{\min}(U) - h_i, \quad (23)$$

де h_i – висота ізоляторів (рис. 1), м.

Висота h_i повинна прийматися згідно з паспортними даними обраних ізоляторів, але у загальному випадку у першому наближенні може бути прийнята рівною 1,0 м, за винятком випадку, коли використовуються штиреві ізолятори (для ПЛ з напругою до 35 кВ), тоді h_i дорівнює 0.

З іншого боку стріла провису може бути визначена з рівняння [3, 4], м

$$f = \frac{\gamma_m l^2}{8\sigma_{cp}}, \quad (24)$$

де γ_m – питоме навантаження від маси дроту або тросу, Н/(м·мм²); σ_{cp} – припустиме механічне напруження для дроту або тросу при середньорічній температурі, Н/мм².

Стріла провису за рівняннями (23) та (24) не враховує її зміни згідно з режимом та умовами експлуатації, це необхідно враховувати при розрахунку сил натягу дротів або тросів.

Питоме навантаження від маси дроту або тросу, Н / (м·мм²)

$$\gamma_m = \frac{P_m}{q}, \quad (25)$$

де q – перетин дроту або тросу, мм².

Для сталелеалюмінієвих дротів перетин q складається з перетинів сталі q_s та алюмінію q_a .

Припустимо механічне напруження для дроту або тросу при середньорічній температурі для більшості випадків [7, 8], Н/мм²

$$\sigma_{\text{ср}} = \frac{0,3P_{\text{max}}}{q}, \quad (26)$$

де P_{max} – розрахункова сила розриву дроту або тросу, Н.

Після підстановки (25) та (26) в (24) стріла провису, м

$$f = \frac{P_m l^2 q}{8q \cdot 0,3P_{\text{max}}} = \frac{P_m l^2}{2,4P_{\text{max}}}. \quad (27)$$

Теоретичний максимум габаритного прольоту за умовами утримання маси дроту або тросу без урахування дії ожеледі та вітру з (27), м

$$l_{\text{max}} = \sqrt{\frac{2,4P_{\text{max}}}{P_m} f}. \quad (28)$$

За відсутності ожеледі та вітру питома механічне навантаження на дріт або трос, Н/(м·мм²)

$$\gamma = \gamma_m + \gamma_n, \quad (29)$$

де γ_n – питома механічне навантаження натягу дроту або тросу, Н/(м·мм²).

Питома механічне навантаження натягу дроту або тросу рекомендується приймати не більше 40% загального навантаження [7, 8], тому

$$\gamma = \gamma_m + 0,4\gamma,$$

відповідно, Н/(м·мм²)

$$\gamma = \frac{\gamma_m}{0,6} \quad \text{та} \quad \gamma_n = \frac{2\gamma_m}{3},$$

або з урахуванням (29), Н/(м·мм²)

$$\gamma_{\text{н}} = \frac{2P_m}{3q}. \quad (30)$$

Тоді з урахуванням (25) та (30) мінімальне припустиме питоге механічне навантаження на дрiт або трос, що забезпечує задовiльне значення стрiли провису, Н/(м·мм²)

$$\gamma_{\text{min}} = \gamma_{\text{н}} + \gamma_m = \frac{2P_m}{3q} + \frac{P_m}{q} = \frac{5P_m}{3q}.$$

Значення γ_{min} повинно бути менше, ніж значення, отримане з формули (24)

$$\gamma_{\text{min}} < \gamma = \frac{2,4P_{\text{max}}f}{ql^2},$$

вiдповiдно перший практичний можливий максимум габаритного прольоту, м

$$l'_{\text{max}} = 1,2 \sqrt{\frac{P_{\text{max}}}{P_m} f}.$$

Другий практичний можливий максимум габаритного прольоту визначається за умов наявності ожеледі та вiтру.

Розрахункове навантаження масою та натягом за умовами забезпечення припустимого значення стрiли провису дротiв або тросiв залежно вiд довжини габаритного прольоту l , Н

$$P_{\text{мн}}(l) = q\sigma(l) = q \frac{\gamma_m l^2}{8f} = \frac{P_m l^2}{8f}. \quad (31)$$

Загальне питоге механічне навантаження на дрiт або трос при ожеледі та вiтрі залежно вiд довжини габаритного прольоту l з урахуванням (18), (20) та (31), Н/(м·мм²)

$$\gamma_{\Sigma}(l) = \frac{1}{ql} \sqrt{P_w^2(l) + [P_R(l) + P_{\text{мн}}(l)]^2} = \frac{1}{q} \sqrt{\left[k_{\text{wR}} A \left(0,9 + \frac{30}{50+l} \right) \right]^2 + \left[B + \frac{P_m l}{8f} \right]^2}.$$

Значення $\gamma_{\Sigma}(l)$ не повинно перевищувати максимальне припустиме навантаження, яке вiдповiдає 30% максимального

значення навантаження розриву дроту або тросу [7, 8], відповідно

$$\gamma_{\Sigma}(l) \leq \gamma_{\max}(l) = 0,3 \frac{P_{\max}}{ql}.$$

Другий практичний можливий максимум габаритного прольоту l''_{\max} знаходиться шляхом розв'язування рівняння

$$\sqrt{\left[k_{wR} A \left(0,9 + \frac{30}{50 + l''_{\max}} \right) \right]^2 + \left[B + \frac{P_m l''_{\max}}{8f} \right]^2} = 0,3 \frac{P_{\max}}{l''_{\max}}.$$

Це рівняння можна вирішити графічно або аналітично за допомогою чисельних методів.

Таким чином, габаритний проліт визначається за нерівностями

$$l \leq l'_{\max} \wedge l \leq l''_{\max}.$$

Розраховане значення габаритного прольоту апіорі повинне бути менше, ніж величина отримана за (28).

Висновки та перспективи подальших досліджень. Запропонований алгоритм розрахунку дозволяє визначити габаритний проліт ПЛ за спрощеною методикою без застосування додаткових довідникових даних. Застосовані апроксимуючі функції майже не мають похибок, що надає можливість стверджувати про високий рівень точності запропонованого алгоритму.

Необхідно виконати остаточну оцінку точності запропонованої методики визначення габаритного прольоту шляхом її застосування для широкого спектру типів опор та дротів з наступним порівнянням з результатами експериментальних досліджень.

Список використаних джерел:

1. Кімстач О.Ю. Метод порівняльних оцінок для вибору оптимальної структури електроенергетичної системи / О.Ю. Кімстач, В.Є. Єрмоленко // Sciences of Europe. – Praha, – 2018. – Vol 1, № 23. – С. 63-69.
2. Шклярчук Ф.Н. Нелинейные колебания и галопирование провода с обледенением / Ф.Н. Шклярчук, А.Н. Данилин // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2013. – Вып. 11 – С. 188-197.
3. Wydra M. Overhead Transmission Line Sag Estimation Using a Simple Optomechanical System with Chirped Fiber Bragg Gratings. Part 1: Preliminary Measurements / M. Wydra, P. Kisala, D. Harasim, P. Kacejko // Sensors. – 2018, – № 18 (1), 309.

4. Pavlinić A. Direct monitoring methods of overhead line conductor temperature / A. Pavlinić, V. Komen // Engineering Review, – 2017. – Vol. 37, Issue 2, – pp. 134-146.
5. Oluwajobi F. I. Effect of Sag on Transmission Line / F.I. Oluwajobi, O.S. Ale, A. Ariyanninuola // Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences (JETEAS). – 2012. – № 3 (4), – pp. 627-630.
6. Петров В.С. Механический расчет проводов и тросов воздушных линий как основа расчета надежности конструкций / В.С. Петров, Т.И. Дубровская // Интернет-журнал «Науковедение». – 2015. – Том 7, № 6. <http://naukovedenie.ru/PDF/99TVN615.pdf>
7. Правила устройства электроустановок / М-во энерг. Рос. Федерации. – 7-е изд. – М.: ЭНАС, 2004.
8. Правила улаштування електроустановок / Міненерговугілля України - 5-те вид., переробл. й доповн. – 2014.
9. Свешникова Е.Ю. Техническое сопоставление различных конструкций воздушных линий электропередач / Е.Ю. Свешникова, С.В. Маколдин // Современная наука: актуальные проблемы и пути их решения. Липецк: ООО «Максимал информационные технологии». – 2016. – № 6 (28). – С. 5-6.
10. Васюра Ю.Ф. Условие экономической целесообразности сооружения линий электропередачи с применением проводов с улучшенными характеристиками / Ю.Ф. Васюра, М.А. Глазырин, Т.А. Плешкова // Аллея науки. – 2017. – Т. 2. № 15. – С. 647-650.
11. Карасев Н.А. К вопросу о применении компактных ВЛЗ 35 кВ / Н.А. Карасев // Журнал ЭЛЕКТРО – 2008. – № 4 – С. 39-40.
12. Горохов Є. В. Аналіз причин і наслідків аварій на ділянках ПЛ 330 кВ Джанкойських МЕМ кримської електроенергетичної системи НЕК «Укренерго» / Є. В. Горохов, С. М. Бакаєв, Я. В. Назім, В. В. Моргай, М. С. Попов // Металеві конструкції. – Макеевка, 2010. – Том 16, № 2. – С. 75-92.
13. Белицын И.В. Модели внешних воздействий на электромагнитное поле воздушной линии электропередач для аналитико-имитационного моделирования / И.В. Белицын // Ползуновский вестник. – 2011. – №2 / 2 – С. 49-55.

*О. Ю. Кимстач, С. Н. Новогрецкий, В. Е. Милев. **Габаритный пролет воздушных линий электроснабжения.***

Рассмотрены вопросы определения с помощью аппроксимирующих функций длин габаритных пролетов воздушных линий электроснабжения, которые строятся на основе железобетонных, композиционных, металлических решетчатых и многогранных опор. Длина габаритного пролета определяется с помощью непрерывных функций, что позволяет выполнить поиск ее для любой комбинации исходных данных и применять ее в алгоритмах автоматизированных комплексов проектирования систем электроснабжения.

Ключевые слова: воздушная линия электроснабжения, габаритный пролет, стрела провисания, аппроксимация, непрерывная функция.

O. Kimstach, S. Novogretskiy, V. Milev. **Span of overhead transmission lines.**

The calculation tasks of the span length of electrical transmission lines, which are constructed on the basis of ferroconcrete, composite, metal lattice and polyhedral transmission towers, using of approximating functions are considered. The span length is determined with the help of the continuous functions, which allows to search it for any combination of input data and to apply it in the algorithms of CAD of power supply systems.

Keywords: overhead transmission line, span, sag, approximation, continuous function.