

УДК 621.315.62.027.3.004.1.

В. С. Собчук, к. т. н., проф., Н. В. Собчук, к. т. н., доц.; О. В. Слободянюк, к. п. н.

ОСОБЛИВОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНІЧНОГО ПОКАЗНИКА ЕФЕКТИВНОСТІ ГРОЗОЗАХИСТУ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ

Запропоновано методуку й математичну модель для визначення одного із складників технічного показника ефективності грозозахисту повітряних ліній електропередачі – питомої кількості очікуваних аварійних вимикань лінії за грозовий сезон від прямих ударів у грозозахисний трос у середині прогону з урахуванням механічних розрахунків несинхронного розгойдування проводів у прогоні.

Ключові слова: завдання і критерії грозозахисту лінії; тросові блискавковідводи; грозозахисний рівень за швидкістю наростання струму блискавки.

Ефективність грозозахисту повітряних ліній електропередачі аналізують для таких характерних випадків ураження блискавкою:

- прямий удар у верхівку опори з аналізом умов зворотнього перекриття ізолюваної підвіски фазного проводу (α_1);
- прямий удар у трос у середині прогону з аналізом умов імпульсного пробую повітряного проміжку трос – провід фази (α_2);
- прямий удар блискавки поза тросом у фазний провід у середині прогону (α_3).

Фізичні основи і алгоритм визначення технічного показника ефективності грозозахисту повітряних ліній електропередачі розглядали в багатьох роботах [1, 2, 3], і результати підтверджені досвідом експлуатації. Недостатньо переконливі в цих роботах аналітичні залежності для визначення складника α_2 – питомої кількості очікуваних аварійних вимикань лінії за грозовий сезон від ударів блискавки в трос у середині прогону і критичного значення швидкості наростання струму блискавки на фронті аперіодичного імпульсу. У цій роботі дано більш чітке обґрунтування критичної величини цього параметра.

Результати дослідження

Авторами цієї статті запропоновано більш чітке обґрунтування визначення критичної величини швидкості наростання струму блискавки на фронті.

У результаті удару блискавки в трос у середині прогону між опорами імпульсну напругу на повітряному проміжку довжиною S між тросом і проводом визначають за допомогою заступної схеми, яка наведена на рис. 1 а, де хвильовий опір каналу блискавки приймаємо вдвічі меншим за хвильовий опір тросу, а опір заземлення тросів на опорі не перевищує 0,15.

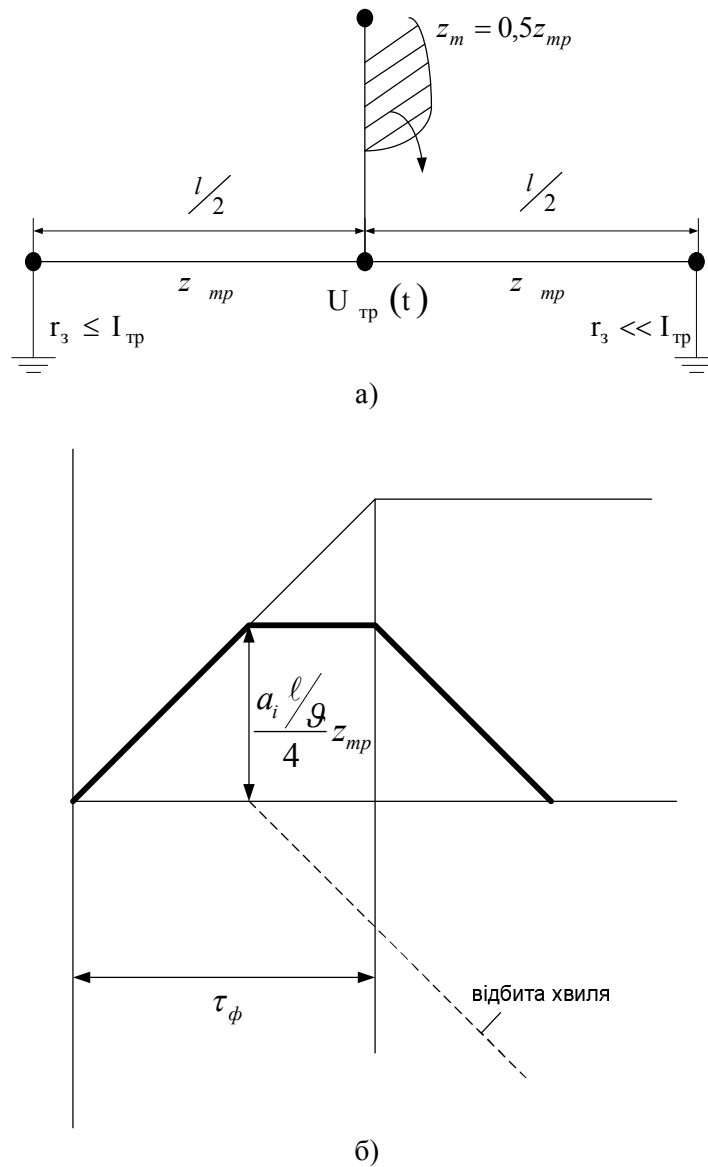


Рис. 1. а) – заступна схема удару блискавки в трос у середині прогону; б) – напруга в місці удару

До приходу відбитих від опорів сусідніх опор хвиль напругу на тросі визначають за формулою:

$$U_{TP}(t) = \frac{a_i \cdot t}{4} \cdot Z_{TP} \quad (1)$$

де a_i – середня швидкість наростання струму на фронті за умови $t \leq \tau_\phi$; Z_{TP} – власний хвильовий опір тросу з урахуванням імпульсної корони, яка зменшує його на 10÷50 % порівняно з геометричним значенням [4].

Через інтервал часу $\tau = 2 \cdot \frac{l}{2} \cdot \frac{1}{v}$ відбиті від заземлювачів опор хвилі з коефіцієнтом відбиття $\beta_{21} \approx -1,0$ підходять до місця удару блискавки в трос одночасно, і наростання напруги припиняється. Максимальна напруга на тросі

$$U_{TP}(t = \tau_\phi) = \frac{a_i \cdot l}{4} \cdot Z_{TP} \quad (2)$$

залежить від швидкості наростання на фронті імпульсу струму a_i і довжини проводу l . Ця напруга утримується на тросі в межах тривалості фронту.

Максимальна напруга між тросом і проводом у середині прогону залежить від коефіцієнта зв'язку трос – провід у динамічному режимі k_δ

$$U_{TP-PP} = a_i(1 - k_\delta) \cdot \frac{l \cdot v}{4} \cdot Z_{TP}. \quad (3)$$

Умову електричного пробую повітряної ізоляції у проміжку S може бути визначено за формулою:

$$U_{TP-PP} \geq E_{p.cер.} \cdot S, \quad (4)$$

де $E_{p.cер.}$ – середній розрядний градієнт повітряного проміжку моделі голка – проти голки становить $E_{p.cер.} \approx 750$ кВ/м.

Механічні розрахунки за умови «пляски» проводів [5] показують, що величина $S \geq 0,02l$, тому (4) набуває вигляду

$$U_{TP-PP} \geq 750 \cdot 0,02l = 15l. \quad (5)$$

Підстановка (5) у (3) дозволяє визначити критичну крутизну струму блискавки $a_{i\text{кр.}}$:

$$a_{i\text{кр.}} \geq \frac{15l}{(1 - k_\delta)} \cdot \frac{v}{1} \cdot \frac{4}{Z_{TP}} = \frac{45}{1 - k_\delta}, \quad (6)$$

де $v = 300$ м/мкс; $Z_{TP} = 400$ Ом.

Із (6) видно, що критична крутизна залежить від коефіцієнта зв'язку трос – провід у динамічному режимі k_δ .

Дослідженню коефіцієнтів зв'язку трос – провід у динамічному режимі присвячена робота [5]. Результати цієї роботи:

– геометричний коефіцієнт зв'язку трос – провід

$$k_\Gamma = \frac{\ln \frac{\alpha_{12}'}{\alpha_{12}}}{\ln \frac{2h_{cер}}{r}} = 0,1 \div 0,3;$$

– динамічний коефіцієнт зв'язку на 10÷50 % більший

$$k_\delta \approx 0,15 \div 0,45.$$

Підстановка k_δ у (6) дозволяє визначити $a_{i\text{кр.}}$:

$$a_{i\text{кр.}} \geq \frac{45}{1 - k_\delta} = 60 \div 90 \text{ кВ/мкс.}$$

Висновки

Запропоновано методику визначення критичної швидкості наростання струму блискавки на фронті аперіодичного імпульсу, перевищення якої призводить до пробую повітряного проміжку між тросом і проводом у середині прогону.

Запропоновано аналітичну залежність, у якій враховано механічні розрахунки мінімальної відстані між тросом та проводом фази в середині прогону під час несинхронного розгойдування проводів.

Показано в математичній моделі, що критична швидкість наростання струму блискавки не залежить від відстані між сусідніми опорами лінії електропередачі, а залежить від коефіцієнта зв'язку трос–провід у динамічному режимі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Александров Г. Н. Установки сверхвысокого напряжения и охрана окружающей среды : [Учебное пособие для вузов] / Александров Г. Н. – Л. : Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1989. – 360 с.
2. Бриснякович А. Д. Расчет проводов подстанций и больших переходов ЛЭП / Бриснякович А. Д. – Л. : «Энергия», 1975. – 248 с.
3. Техника высоких напряжений. Учебник для студентов электротехнических и электроэнергетических специальностей вузов / [под общей ред. Д. В. Разевича]. – М. : Энергия, 1976. – 488 с.
4. Иерусалимов М. Е. Техника высоких напряжений / М. Е. Иерусалимов, Н. Н. Орлов; под общ. ред. М. Е. Иерусалимова. – Киев: Изд-во Киевского университета, 1967. – 444 с.
5. Черников А. А. Основы грозозащиты высоковольтных электроустановок / Черников А. А. – Куйбышев : Куйбышев. политехн. ин-т, 1971. – 112 с.

Собчук Валерій Степанович – к. т. н., професор кафедри електричних станцій та систем.

Собчук Наталія Валеріївна – к. т. н., доцент кафедри електричних станцій та систем.

Слободянюк Олена Валеріївна – к. п. н., ст. викладач кафедри комп'ютерного еколого-економічного моніторингу та інженерної графіки (КЕЕМІГ).
Вінницький національний технічний університет.

V. S. Sobchuk, Cand. Sc. (Eng.), Prof.; N. V. Sobchuk, Cand. Sc. (Eng.), Assist. Prof.;

O. V. Slobodianiuk, Cand. Sc. (Educ.)

CHARACTERISTIC FEATURES OF DETERMINATION OF LIGHTNING PROTECTION EFFICIENCY INDEX FOR OVERHEAD TRANSMISSION LINES

Technique and mathematical model for determination of one of the components of overhead transmission lines lightning protection technical index efficiency – specific amount of expected emergency disconnections of the line in thunderstorm season as a result of direct impacts into overhead ground-wire cable in the middle of the span, taking into account mechanical calculations of asynchronous motion of wires in the span, is suggested.

Key words: objectives and criteria of line lightning protection; lightning conductors; lightning protection level by the rate of lightning current growth.

Efficiency of lightning protection of the overhead transmission lines is analyzed for the following characteristic cases of lightning strokes:

- direct stroke in the top of the support with the analysis of the conditions of reverse overlapping of phase conductor insulated suspension (α_1);
- direct stroke in the wire in the middle of the span with the analysis of the conditions of pulse break-down of wire-phase conductor air gap (α_2);
- direct stroke of lightning outside the wire in phase conductor in the middle of the span (α_3).

Physical fundamentals and algorithm of determination of lightning protection technical index efficiency of overhead transmission lines were considered in numerous research [1, 2, 3], the results are proved by operation experience. But analytical dependences for determination of the component α_2 – specific amount of the expected emergency disconnections of the line in thunderstorm season as a result of lightning strokes in the wire in the middle of the span and critical value of lightning current growth rate on the front of aperiodic impulse are not sufficiently reliable. The given paper suggests more accurate substantiation of the critical value of this parameter.

The results of the research

The authors of the given paper suggest more accurate substantiation of determination of critical value of lightning current growth rate on the front determination.

As a result of lightning stroke in the wire in the middle of the span between the supports, pulse voltage in S length air gap between the wire and the conductor is determined by means of equivalent circuit, shown in Fig. 1 *a*, where wave resistance of lightning channel is assumed to be two times less than wave resistance of the wire, and resistance of wires grounding at the support does not exceed 0.15.

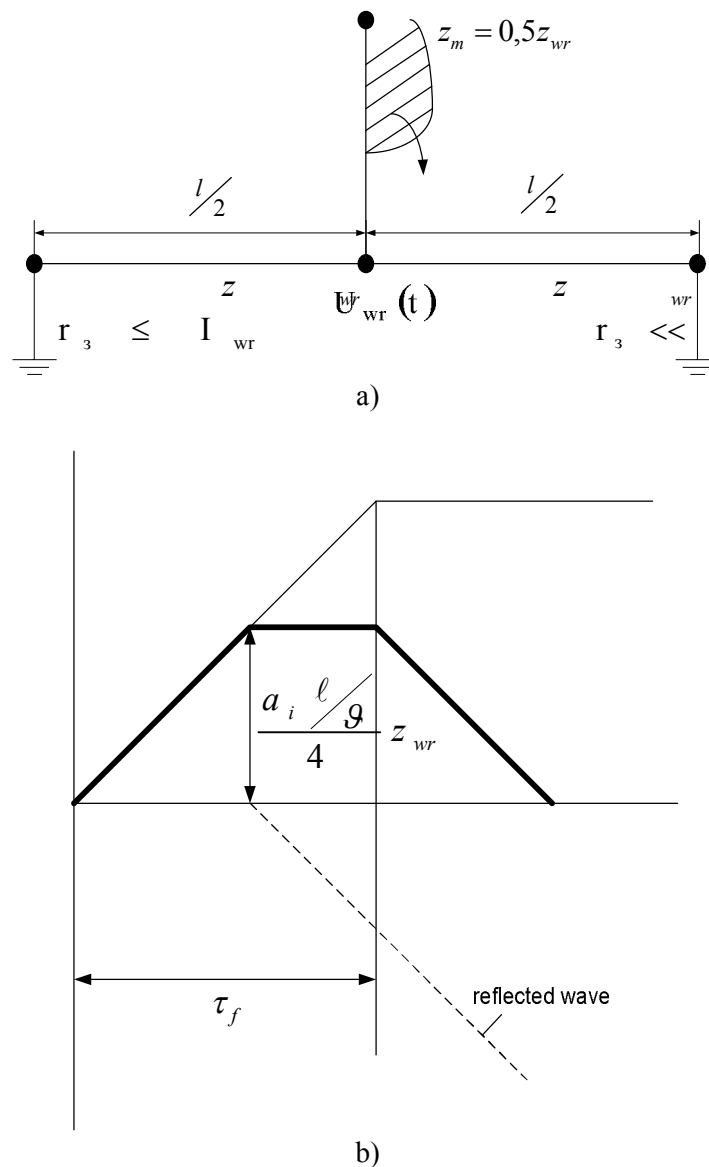


Fig. 1. a) – equivalent circuit of lightning stroke in the wire in the middle of the span; b – voltage in the place of stroke

Prior to arrival of the waves, reflected from the resistances of neighboring supports, voltage at the wire is determined by the formula:

$$U_{wr}(t) = \frac{a_i \cdot t}{4} \cdot Z_{wr}, \quad (1)$$

where a_i – average rate of current growth on the front at condition $t \leq \tau_f$; Z_{wr} – wave resistance of the wire, taking into account pulse corona, that decreases it by 10÷50 % as compared with geometric value [4].

In time interval $\tau = 2 \cdot \frac{l}{2} \cdot \frac{1}{v}$ waves, reflected from supports ground rods with reflection factor $\beta_{21} \approx -1.0$ arrive to the place of lightning stroke into the wire simultaneously and voltage growth stops. Maximum voltage on the wire

$$U_{wr}(t = \tau_f) = \frac{a_i \cdot l}{4} \cdot Z_{wr} \quad (2)$$

depends on the rate of current a_i pulse growth on the front and the length of the conductor l . This

voltage is maintained at the wire within the limits of front duration.

Maximum voltage between the wire and conductor in the middle of the span depends on the coupling factor wire-conductor in dynamic mode k_d

$$U_{wr-cd} = a_i(1-k_d) \cdot \frac{l/v}{4} \cdot Z_{wr} \quad (3)$$

Condition of electric break-down of air insulation in S interval can be determined by the formula:

$$U_{wr-cd} \geq E_{dc.av} \cdot S, \quad (4)$$

where $E_{dc.av}$ – average discharge gradient of the air gap of the model needle against needle is $E_{dc.av} \approx 750$ kV/m.

Mechanical calculations on conditions of «line-wire dancing» [5] show that value $S \geq 0.02l$, that is why (4) takes the form

$$U_{wr-cd} \geq 750 \cdot 0.02l = 15l. \quad (5)$$

Substitution of (5) into (3) enables to determine critical slope of lightning current $a_{i cr.}$:

$$a_{i cr.} \geq \frac{15l}{(1-k_d)} \cdot \frac{v}{1} \cdot \frac{4}{Z_{wr}} = \frac{45}{1-k_d}, \quad (6)$$

where $v = 300$ m/ μ s; $Z_{wr} = 400$ Ohm.

It is seen from (6) that critical slope depends on wire-conductor coupling factor in dynamic mode k_d .

Investigation of coupling factor in dynamic mode is considered in [5]. The results of investigations:

– geometrical coefficient of wire—conductor coupling factor

$$k_G = \frac{\ln \frac{\alpha_{12}}{\alpha_{12}}}{\ln \frac{2h_{av}}{r}} = 0.1 \div 0.3;$$

– dynamic coupling factor is 10÷50 % greater

$$k_d \approx 0.15 \div 0.45.$$

Substitution of k_d into (6) allows to determine $a_{i cr.}$:

$$a_{i cr.} \geq \frac{45}{1-k_d} = 60 \div 90 \text{ KV}/\mu\text{s}.$$

Conclusion

The technique, aimed at determination of critical speed of lightning current growth on the front of aperiodic pulse, excess of which leads to the break-down of the air gap between the wire and the conductor in the middle of the span is suggested.

Analytical dependence, that takes into consideration mechanical calculations of minimal distance between wire and conductor of the phase in the middle of the span during out of phase swinging of conductors is suggested.

In mathematical model it is shown that critical speed of lightning current growth does not depend on the distance between neighboring power transmission line supports, but depends on coupling factor wire-conductor in dynamic mode.

REFERENCES

1. Александров Г. Н. Установки сверхвысокого напряжения и охрана окружающей среды : [Учебное пособие для вузов] / Александров Г. Н. – Л. : Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1989. – 360 с.
2. Бриснякович А. Д. Расчет проводов подстанций и больших переходов ЛЭП / Бриснякович А. Д. – Л. : «Энергия», 1975. – 248 с.
3. Техника высоких напряжений. Учебник для студентов электротехнических и электроэнергетических специальностей вузов / [под общей ред. Д. В. Разевича]. – М. : Энергия, 1976. – 488 с.
4. Иерусалимов М. Е. Техника высоких напряжений / М. Е. Иерусалимов, Н. Н. Орлов; под общ. ред. М. Е. Иерусалимова. – Киев: Изд-во Киевского университета, 1967. – 444 с.
5. Черников А. А. Основы грозозащиты высоковольтных электроустановок / Черников А. А. – Куйбышев : Куйбышев. политехн. ин-т, 1971. – 112 с.

Sobchuk Valeriy – Cand. Sc. (Eng.), Professor with the Chair of Electric Stations and Substations.

Sobchuk Natalija – Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor with the Chair of Electric Stations and Substations.

Slobodianiuk Olena – Cand. Sc.(Educ.), Senior Lecturer with the Chair of Computer Ecological and Economic Monitoring and Engineering Graphics (CEEMEG).

Vinnitsia National Technical University.