

ВЛИЯНИЕ ГРОЗОЗАЩИТНОГО ТРОСА НА МАГНИТНУЮ СОСТАВЛЯЮЩУЮ ИНДУКТИРОВАННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

В электрических сетях Российской Федерации большее внимание стало уделяется надежной эксплуатации распределительных сетей напряжением 6–35 кВ. На эксплуатацию распределительных ВЛ 6–35 кВ оказывают существенное влияние молниевые перенапряжения, связанные с прямым ударом молнии в линию, и индуцированные перенапряжения, при ударах молнии в землю вблизи ВЛ. Воздействующие на ВЛ 6–35 кВ молниевые перенапряжения приводят к повышению аварийности ВЛ при эксплуатации из-за относительно невысокой импульсной электрической прочности линейной изоляции линий. Применение тросовой защиты на ВЛ 6–35 для защиты от молниевых перенапряжений ВЛ в РФ не рассматривается. Как показывают расчеты установка заземленного троса на ВЛ за счет коэффициентов связи троса с проводом снижает величину индуцированных перенапряжений. Представлена математическая модель расчета электромагнитной составляющей индуцированного перенапряжения на основе подхода, использующего волновое уравнение линии с распределенным по ее длине источником напряжения, создаваемым индуцируемой током молнии ЭДС при наличии заземленного троса на линиях электропередачи 35 кВ. Исследованы вопросы индуцированных перенапряжений, возникающих при повторных разрядах молнии, которые могут приводить к большим амплитудам магнитной индуцированной компоненты перенапряжений по сравнению с главным разрядом тока молнии. Электростатическая компонента индуцированных перенапряжений при повторных разрядах молнии имеет меньшие значения, так как разряд происходит по частично ионизованному каналу, в условиях которого лидерная стадия разряда характеризуется меньшими напряженностями электрического поля. Показано, что наличие троса на ВЛ 35 кВ с распределенной проводимостью приводит к появлению потенциала на тросе, при этом величина потенциала на тросе при крутых фронтах тока молнии близка к 50% от величины магнитной составляющей индуцированного напряжения на фазном проводе.

Ключевые слова: индуцированные перенапряжения; магнитная компонента перенапряжения; повторные удары молнии; воздушные линии с тросом; молниезащита.

Ссылка при цитировании:

Титков В.В., Колычев А.В., Гулов А.М. Влияние грозозащитного троса на магнитную составляющую индуцированных перенапряжений воздушных линий электропередачи // Материаловедение. Энергетика. 2021. Т. 27, № 3. С. 5–16. DOI: 10.18721/JEST.27301

Эта статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

V.V. Titkov, A.V. Kolychev, A.M. Gulov

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia

THE EFFECT OF A GROUNDED WIRE ON THE MAGNETIC COMPONENT OF INDUCED OVERVOLTAGES OF OVERHEAD TRANSMISSION POWER LINES

In the electric grids of the Russian Federation, the reliable operation of distribution grids with a voltage of 6–35 kV is attracting more and more attention. Their operation is under significant influence of lightning overvoltages associated with a direct lightning strike into the line, and induced overvoltages when lightning strikes the ground near the overhead line. The lightning overvoltages affecting the 6–35 kV overhead lines lead to an increase in their accident rate during operation due to the relatively low impulse electric strength of the linear insulation of the lines. Cable protection against lightning overvoltages is not used for the 6–35 kV overhead lines in the Russian Federation. As calculations show, the installation of a grounded cable on overhead lines due to the coefficients of the connection between the cable and the wire reduces the magnitude of the induced overvoltages. The paper presents a mathematical model for calculating the electromagnetic component of an induced overvoltage based on an approach that uses the wave equation of a line with a voltage source distributed along its length, created by an EMF induced by lightning current in the presence of a grounded wire on 35 kV power lines. The issues of inductive overvoltage arising during repeated lightning discharges, which can lead to large amplitudes of the magnetic inductive component of overvoltages in comparison with the main discharge of the lightning current, are investigated. The electrostatic component of induced overvoltages has lower values during repeated lightning discharges, since the discharge occurs through a partially ionized channel, in which the leader stage of the discharge is characterized by lower electric field strengths. It is shown that the use of a grounded wire with distributed conductivity on a 35 kV overhead line causes a potential on the wire, which at steep fronts of the lightning current is close to 50% of the value of the magnetic component of the induced voltage on the phase wire.

Keywords: Induced overvoltage, magnetic component of overvoltage, repeated return lightning strikes, overhead line with grounded wire; lightning protection.

Citation:

V.V. Titkov, A.V. Kolychev, A.M. Gulov, The effect of a grounded wire on the magnetic component of induced overvoltages of overhead transmission power lines, *Materials Science. Power Engineering*, 27 (03) (2021) 5–16, DOI: 10.18721/JEST.27301

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение. Одной из основных причин аварий воздушных ЛЭП является поражение молнией [1–4]. Наряду со случаями прямых ударов молнии в элементы конструкции воздушной линии опасные перенапряжения на линиях классов 6–35 кВ возникают при ударе молнии в землю вблизи линии [3–7]. Данные перенапряжения носят название индуктированных, а их физическая природа связана с двумя факторами. Первый из них это электростатическое воздействие канала разряда молнии на провода линии на стадии своего формирования, когда он представляет собой заряженную плазму. Второй фактор бесконтактного воздействия молнии на провод ЛЭП – магнитная связь провода с током молнии. Последний достигает наибольших значений в результате формирования обратного разряда и перехода канала молнии в плазменное состояние с относительно высокой электропроводностью [8]. При этом амплитуда тока первого молниевых импульса может достигать 200 кА, а время нарастания до максимума имеет порядок 10 мкс.

Согласно ПУЭ [9] трос используется на ВЛ 35 кВ на подходе к ПС в рамках молниезащиты подстанций. Во многих странах на ВЛ распределительного класса (11 кВ, 20 кВ, 24 кВ, 33 кВ) широко применяется тросовая защита. Применение заземленных тросов на распределительных воздушных линиях среднего класса напряжения не очень эффективно из-за низкой импульсной прочности линейной изоляции. С другой стороны, применение заземленного троса может существенно снизить амплитуду воздействующих индуктированных перенапряжений на линейную изоляцию ВЛ.

Для защиты ВЛ от индуктированных перенапряжений в последнее время нашли широкое применение защитные аппараты – нелинейные ограничители перенапряжения [10–15]. Использование защитных тросов и ограничителей перенапряжения описано в стандарте IEEE Std. 1410–1997 [16]. На рис. 1 представлена зависимость, показывающая эффект ослабления заземленного

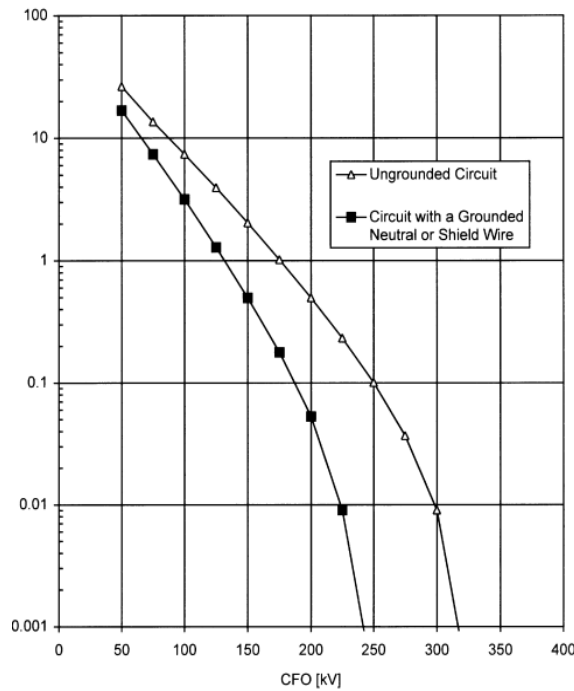


Рис. 1. Число перенапряжений с амплитудой, превышающей импульсную прочность изоляции, $U_{50\%}$ на 1/100 км в год при учете заземленного проводника

Fig. 1. The number of overvoltages with an amplitude exceeding the impulse insulation strength, $U_{50\%}$ per 1/100 km per year when taking into account the grounded wire

проводника, рассчитанная с использованием упрощенной формулы «коэффициента экранирования», предложенной Раском, которая, в общем случае дает завышенную оценку соответствующего эффекта уменьшения наведенных напряжений фазного проводника.

Численные модели расчета индуктированных перенапряжений

Для численной оценки амплитуды индуктированного напряжения на проводах линии при наличии заземленного троса в руководствах предлагается использовать формулу вида [3, 4]:

$$U_{инд[B]} = \frac{h_{cp}}{b} I_M \cdot (1 - k_{т.пр}) \cdot k_{э} + k_m \cdot \frac{h_{cp}}{b} \cdot I_M \quad (1)$$

Для линий без троса:

$$U_{инд[B]} = (k_m + k_э) I_M \frac{h_{cp}}{b} \cong 30 I_{M[A]} \frac{h_{cp}}{b}, \quad (2)$$

где I_M – амплитуда тока молнии, h_{cp} – средняя высота подвеса провода, b – расстояние от места удара молнии до проекции провода на горизонтальную поверхность земли (рис. 2), k_m – коэффициент магнитной связи, $k_э$ – коэффициент электростатической связи, $k_{т.пр}$ – коэффициент связи троса и провода. Очевидно, что (1) и (2) являются эмпирическими формулами и не имеет ясной связи с физической природой явления. В частности, электростатическая компонента, описываемая в рамках (2), зависит от амплитуды тока молнии, в то время как на стадии разряда, при котором электростатическое влияние существенно (лидерная фаза) ток по каналу

разряда составляет десятки, максимум сотни ампер, а не килоампер, как на главной стадии [7]. Также явное несоответствие физике явления имеет место и в «магнитной» компоненте, которая согласно (1), (2), пропорциональна амплитуде тока молнии, в то время как величина индуктируемого на проводе напряжения в соответствии с законом Фарадея пропорциональна скорости измерения тока молнии dI/dt . При этом, если в рамках эмпирического подхода формула (1) может оставаться приемлемой при оценке электростатической компоненты индуктированного перенапряжения, то оценка магнитной составляющей с помощью (1) и (2) вызывает сомнение. Очевидность данного предположения имеет место при оценке индуктированных перенапряжений, вызываемых повторными ударами молнии, которые следуют с интервалами, измеряемыми десятками долями секунды после первого разряда [5]. Особенностью токовых импульсов повторных разрядов является меньшие в 2-3 раза амплитуды и на порядок меньшее (около 1 мкс) время нарастания (рис. 3 [5]), что приводит к существенному росту dI/dt и соответствующему росту амплитуды перенапряжения. Поэтому, по крайней мере к повторным разрядам молнии, оценку (2) нельзя считать применимой.

В рамках данной работы предпринимается попытка теоретической оценки магнитной составляющей индуктированного перенапряжения, вызываемого молнией при учете заземленного троса.

Полная ЭДС взаимной индукции, возбуждаемая в петле провод-грунт (рис. 2) вследствие магнитной связи с расположенном в точке $x = 0$ каналом разряда, равна нулю вследствие антисимметричного направления нормальной к плоскости петли компоненты вектора напряженности магнитного поля канала разряда в произвольных точках x и $-x$ бесконечного провода. Поэтому в обозначениях рис. 2 в проводе при $x > 0$ и $x < 0$ возникают равные и противоположные по знаку распределенные (в расчете на единицу длины линии [В/м]) ЭДС $E(x)$.

Точные оценки электромагнитной составляющей индуктированного перенапряжения могут быть сделаны на основе предложенного в свое время А.И. Долгиновым [4] подхода, использующего волновое уравнение линии с распределенным по ее длине источником напряжения, созда-

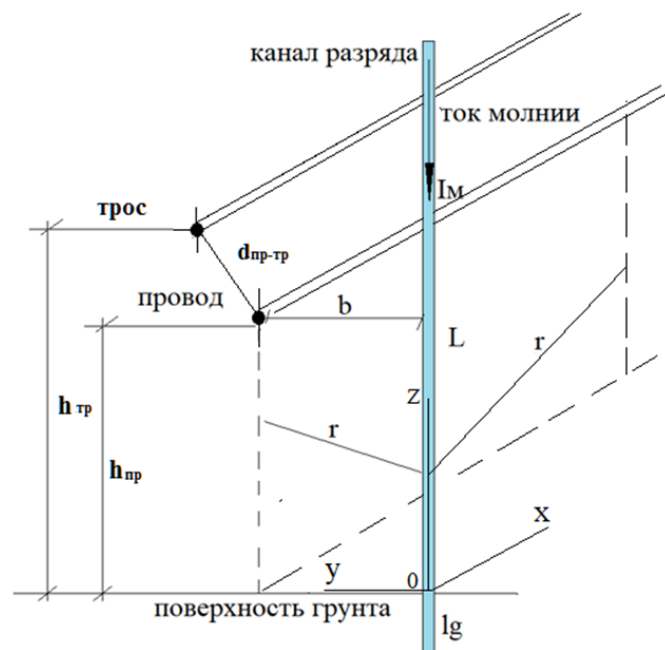


Рис. 2. К расчетной модели магнитной составляющей индуктированного перенапряжения
 Fig. 2. The design model of the magnetic component of the induced overvoltage

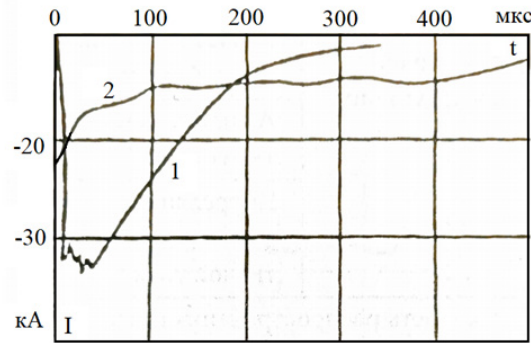


Рис. 3. Типичная осциллограмма импульса тока первой (1) и последующих (2) составляющих многократного разряда молнии отрицательной полярности

Fig. 3. Typical oscillogram of a current pulse of the first (1) and subsequent (2) components of a multiple discharge of lightning of negative polarity

ваемым индуктируемой током молнии ЭДС на проводе (1) и тросе (2). Ниже представлена система телеграфных уравнений для двух связанных емкостной и индуктивной связью проводов (верхняя фаза – грозотрос):

$$-\frac{\partial i_1}{\partial x} = C'_{11} \frac{\partial u_1}{\partial t} + C'_{12} \frac{\partial (u_1 - u_2)}{\partial t} + g'_{11} u_1 + g'_{12} u_2, \quad (3)$$

$$-\frac{\partial i_2}{\partial x} = C'_{12} \frac{\partial u_1}{\partial t} + C'_{22} \frac{\partial (u_2 - u_1)}{\partial t} + g'_{12} u_1 + g'_{22} u_2, \quad (4)$$

$$-\frac{\partial u_1}{\partial x} = L'_{11} \frac{\partial i_1}{\partial t} + L'_{12} \frac{\partial i_2}{\partial t} + R'_1 i_1 - E'_1(x), \quad (5)$$

$$-\frac{\partial u_2}{\partial x} = L'_{12} \frac{\partial i_1}{\partial t} + L'_{22} \frac{\partial i_2}{\partial t} + R'_2 i_2 - E'_2(x), \quad (6)$$

$$E'_1(x) \approx E'_2(x), \quad (7)$$

где C', g', L', R' – погонные параметры линии: емкость, проводимость утечки, индуктивность и резистивное сопротивление соответственно, $u = u(x, t)$, $i = i(x, t)$ – напряжения и ток линии в точке x в момент времени t ,

$$E'(x) = \frac{\mu_0 I' h x}{4\pi} \frac{\left(L + \sqrt{L^2 + b^2 + x^2} \right) \sqrt{L^2 + b^2 + x^2} - \left(\sqrt{l_g^2 + b^2 + x^2} - l_g \right) \sqrt{l_g^2 + b^2 + x^2}}{\left(L + \sqrt{L^2 + b^2 + x^2} \right) \left(\sqrt{l_g^2 + b^2 + x^2} - l_g \right) \sqrt{l_g^2 + b^2 + x^2} \sqrt{L^2 + b^2 + x^2}}$$

– индуктируемая в проводе ЭДС в расчете на единицу длины; индексом 1 отмечены параметры фазного провода, индексом 2 параметры троса, а индексом 12 взаимные параметры провода и троса.

В качестве примера рассмотрим одноцепную ВЛ 35 кВ на опорах ПБ35-1 (рис. 4). В расчетах будет рассмотрена пара проводов – верхний провод АС 120/19 (высота подвеса 18,5 м) и грозотрос ТК-35 (высота подвеса 20,5 м).

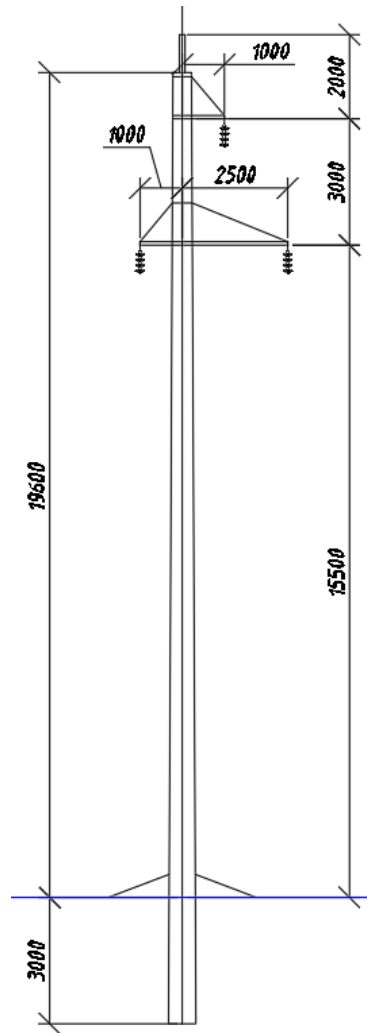


Рис. 4. Эскиз опоры ПБ35-1

Fig. 4. Line tower PB35-1

Необходимо добавить способ учета точек заземления грозотроса. Для этого используется зависимость проводимости утечки для грозотроса от координаты, показанная на рис. 5 при длине пролета 150 м.

В модели COMSOL это глобально определенная функция:

$$cabwave(x) = G_s + G_{gr} \cdot linwave(x)^{22},$$

где G_s – нормальная проводимость утечки (при отсутствии дефектов и загрязнения изоляторов равная нулю) G_{gr} [См/м] – усредненная по линейному размеру фундамента опоры (расстояние между сваями) проводимость ее заземления, $linwave(x)$ – линейно-треугольная периодическая функция с периодом равным удвоенной длине пролета.

Высокая четная степень (в нашем случае 22) позволяет регулировать длину зоны влияния точки заземления троса на величину погонной проводимости утечки вблизи опоры.

Поскольку индуцируемая ЭДС пропорциональна скорости изменения тока молнии, то в простейшем модельном расчете импульс тока молнии можно описать косоугольной формой, исходя из заданных значений времени нарастания τ_f и спада τ_{bf} и амплитуды тока молнии.

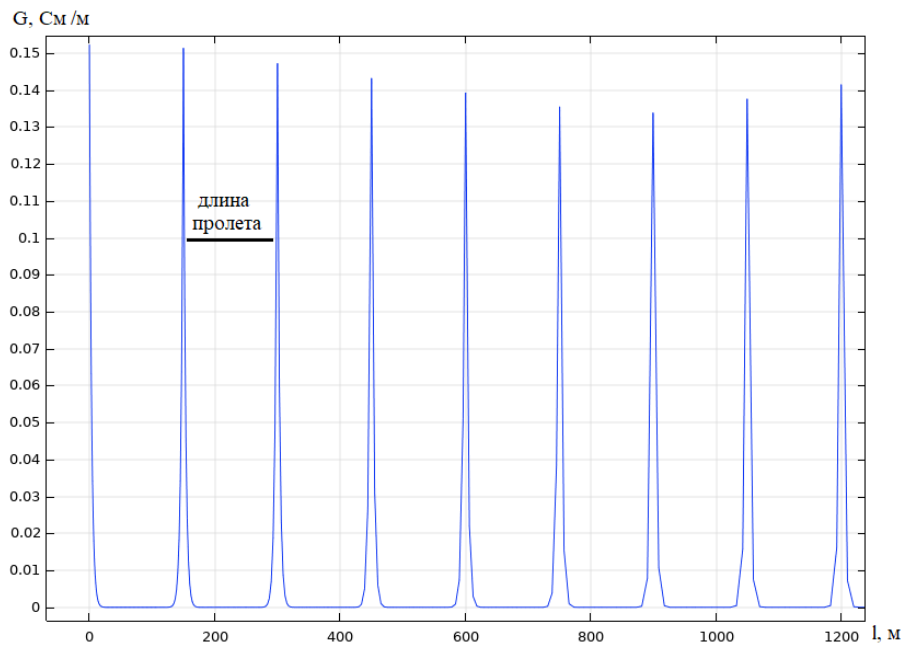


Рис. 5. Зависимость проводимости утечки для грозотроса от координаты
 Fig. 5. Dependence of the leakage conductivity for the ground wire on the coordinate

Результаты

Результаты расчета системы волновых уравнений (3) для системы фаза – трос для индуктируемого воздействия с учетом конечной зоны охвата провода индуктируемой ЭДС вследствие конечной скорости распространения электромагнитной волны, создаваемой каналом молнии, приведены на рис. 6 провода и рис. 7 для заземленного троса для случая первичного импульса молнии ($\tau_f = 10$ мкс, $\tau_{bf} = 100$ мкс, $I_m = 100$ кА, $h = 18,5$ м, $b = b_{\min} = 60$ м).

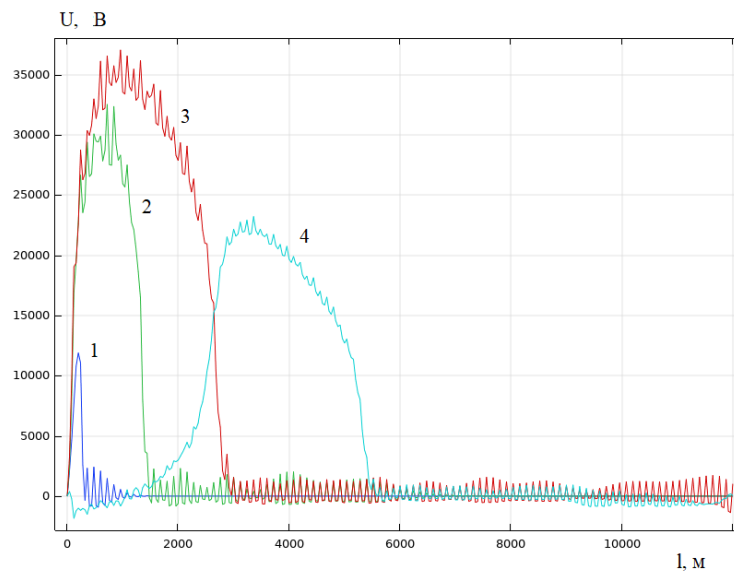


Рис. 6. Распределение индуктированного напряжения вдоль провода
 в моменты времени 1 мкс (1), 5 мкс (2), 10 мкс (3), 20 мкс (4)
 Fig. 6. Distribution of the induced voltage along the wire at times of 1 μ s (1), 5 μ s (2), 10 μ s (3), 20 μ s (4)

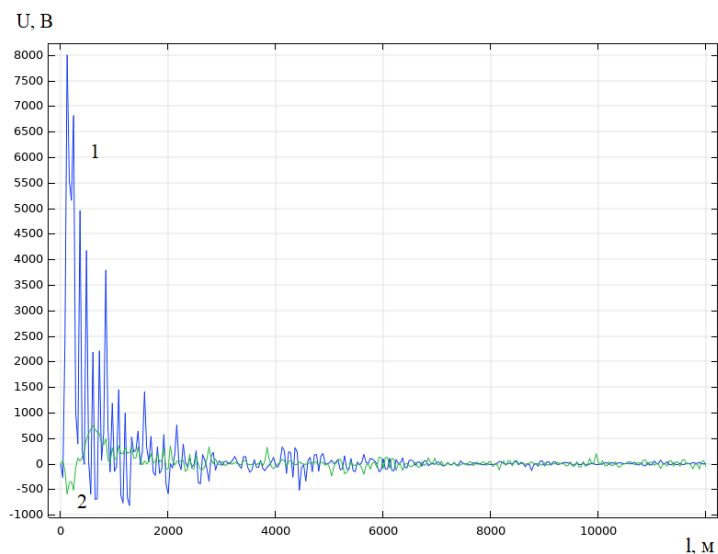


Рис. 7. Распределение индуцированного напряжения вдоль грозотроса в моменты времени 10 мкс (1), 20 мкс (2)
 Fig. 7. Distribution of the induced voltage along the ground wire at times of 10 μ s (1), 20 μ s (2)

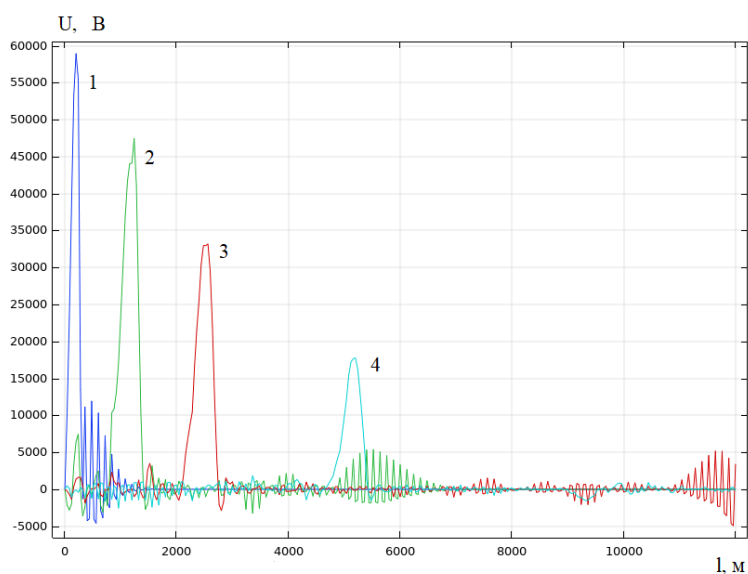


Рис. 8. Распределение индуцированного повторным ударом молнии напряжения вдоль провода в моменты времени 1 мкс (1), 5 мкс (2), 10 мкс (3), 20 мкс (4)
 Fig. 8. Distribution of the induced voltage along the wire at times of 1 μ s (1), 5 μ s (2), 10 μ s (3), 20 μ s (4) with repeated lightning strikes

Из рис. 6 и рис. 7 следует, что амплитуда магнитной составляющей индуцированного напряжения на проводе составляет 36 кВ и 8 кВ на тросе. При удалении места удара молнии в два раза ($b = 120$ м) получим амплитуды напряжения: 24 кВ на проводе и 1,9 кВ на тросе; при $b = 180$ м: 18 кВ и 1,8 кВ соответственно.

Магнитная составляющая индуцированных перенапряжений, вызванная повторным ударом молнии с характерными параметрами $\tau_f = 1$ мкс, $\tau_{bf} = 500$ мкс, $I_m = 50$ кА для аналогичных прочих условий составляет 60 кВ на проводе (рис. 8) и 28 кВ на тросе (рис. 9).

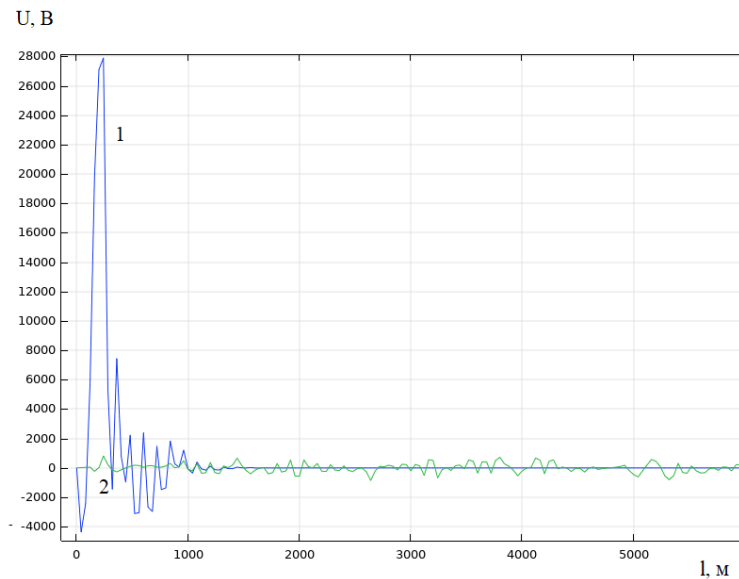


Рис. 9. Распределение индуцированного повторным ударом молнии напряжения вдоль грозотроса в моменты времени 1 мкс (1), 20 мкс (2)

Fig. 9. Distribution of the induced voltage along the ground wire at times of 1 μ s (1), 20 μ s (2) with repeated lightning strikes

При удалении места удара молнии в два раза ($b = 120$ м) амплитуды индуцированного напряжения: 21 кВ на проводе и 14 кВ на тросе; при $b = 180$ м: 6 кВ и 4,5 кВ соответственно.

Как видно из рис. 6, длина участка линии охваченного наиболее опасными перенапряжениями с учетом антисимметричной отрицательной волны, распространяющейся в области $x < 0$ составляет несколько километров. При этом при тех же условиях индуцированное напряжение на тросе охватывает меньшие по длине участки линии (рис. 7).

Наличие троса с учетом распределения его проводимости утечки вдоль пролета приводит при ударах молнии к появлению потенциала на тросе. При амплитуде тока молнии $I_m = 100$ кА величина напряжения на тросе может составлять 22% от индуцированного напряжения на проводе. При увеличении расстояния (более 120 м, $6 \times 3 h_{тр}$) величина напряжения на тросе уменьшается и составляет менее 10% от $U_{инд.пр}$. При воздействии разрядов молнии с крутыми фронтами вызванная повторным ударами молнии с характерными параметрами $\tau_f = 1$ мкс, $\tau_{bf} = 100$ мкс, $I_m = 50$ кА величина индуцированного напряжения на тросе может составлять 47% от индуцированного напряжения на проводе.

Выводы

Важными практическими выводами в отношении магнитной компоненты индуцированного молнией на проводе и тросе ВЛ напряжения, которые можно сделать на основе данного исследования являются:

- влияние удаления точки удара молнии от воздушной линии существенно слабее, чем предсказывает оценочная формула (1), поэтому для линий класса 6-10 кВ, обладающих относительно невысоким запасом импульсной электрической прочности, индуцированные перенапряжения представляют существенный фактор, повышающий аварийность;
- поскольку грозотрос заземляется лишь в отдельных точках, расположенных на опорах линии, то импульс тока молнии вызывает на нем появление электрического потенциала в пролетах;
- появление в зоне удара молнии высоких потенциалов на тросе, снижает разность потенциалов, воздействующих на линейную изоляцию воздушной линии;

– повторные удары могут приводить кратно большим амплитудам магнитной индуктированной компоненты перенапряжения по сравнению с главным импульсом тока молнии.

Таким образом применение грозозащитного троса на ВЛ 6-35 кВ может существенно уменьшить число аварийных отключений ВЛ из-за индуктированных перенапряжений на линиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Халилов Ф.Х., Титков В.В. Перенапряжения и молниезащита. М: Лань, 2016. 224 с.
- [2] Гумерова Н.И., Колычев А.В., Халилов Ф.Х. Молниезащита электрических сетей среднего, высокого и сверхвысокого напряжения. СПб: Издательство Политехнического университета, 2011. 369 с.
- [3] Разевиг Д.В. Техника высоких напряжений. М: Энергия, 1976. 488 с.
- [4] Разевиг Д.В. Техника высоких напряжений. М: ГЭИ, 1963. 473 с.
- [5] Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений РД 153-34.3-35.125-99. СПб: , 1999.
- [6] Кучинский Г.С. Техника высоких напряжений. СПб: Энергоатомиздат, 2003. 608 с.
- [7] Базуткин В.В., Кадомская К.П., Костенко М.В., Михайлов Ю.А. Перенапряжения в электрических системах и защита от них. СПб: Энергоатомиздат, 1995. 320 с.
- [8] Верещагин И.П. Электрофизические основы техники высоких напряжений. М: Издательский дом МЭИ, 2010. 704 с.
- [9] Правила устройства электроустановок. 7-ое издание, переработанное и дополненное. М: 2003.
- [10] Gu S., Chen W., He J., Shen H., Zhang S. Development of surge arresters with series gap against lightning breakage of covered conductors on distribution lines // IEEE Transactions on Power Delivery. 2007. № 4(22). С. 2191–2198.
- [11] Yokoyama S. Distribution surge arrester behavior due to lightning induced voltages // IEEE Trans. Power Del. 1986. № 1(PWRD-1). С. 171–178.
- [12] Nakada K., Yokoyama S., Yokota T., Asakawa A., Kawabata T. Analytical study of failure rates of surge arresters on power distribution lines due to winter lightning // Japan-Korea Joint Symp. Electrical Discharging High Voltage Engineering. 1997. С. 221–224.
- [13] Morooka Y., Yokoyama S., Asakawa A. Protection of power distribution lines against lightning-induced overvoltages by means of surge arresters and overhead ground wire // 8th Int. Symp. High Voltage Engineering. 1993. С. 397–400.
- [14] Piantini A. Lightning protection of overhead power distribution lines // 29th International Conference on Lightning Protection. 2008. № June. С. 1–29.
- [15] Халилов Ф.Х., Котляров Э.Р. Отказ от тросовых молниеотводов и трубчатых разрядников на воздушных линиях 35-150 кВ в районах Крайнего Севера // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2015. № 2(219). С. 41–47.
- [16] IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines IEEE Std. 1410, 1997.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ТИТКОВ Василий Васильевич – профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.
E-mail: titkovprof@yandex.ru

КОЛЫЧЕВ Александр Валерьевич – доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.
E-mail: alkoly4ev@yandex.ru

ГУЛЮВ Александр Михайлович – аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: algulov@yandex.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 27.06.2021

REFERENCES

- [1] **F.Kh. Khalilov, V.V. Titkov**, Perenapryazheniya i molniyezashchita. M: Lan, 2016. 224 с. (Khalilov F.Kh., Titkov V.V. Overvoltage and lightning protection. Moscow: Lan', 2016. 224 p.)
- [2] **N.I. Gumerova, A.V. Kolychev, F.Kh. Khalilov**, Molniyezashchita elektricheskikh setey srednego, vysokogo i sverkhvysokogo napryazheniya. SPb: Izdatelstvo Politekhnicheskogo universiteta, 2011. 369 с. (Gumerova N.I., Kolychev A.V., Khalilov F.Kh. Lightning protection of electrical networks of medium, high and ultra-high voltage. St. Petersburg: Publishing house of the Polytechnic University, 2011. 369 p.)
- [3] **D.V. Razevig**, Tekhnika vysokikh napryazheniy. M: Energiya, 1976. 488 с. (Razevig D.V. High Voltage Engineering. Moscow: Energy, 1976. 488 p.)
- [4] **D.V. Razevig**, Tekhnika vysokikh napryazheniy. M: GEI, 1963. 473 с. (Razevig D. V., High Voltage Engineering. Moscow: GEI, 1963. 473 p.)
- [5] Rukovodstvo po zashchite elektricheskikh setey 6-1150 kV ot grozovykh i vnutrennikh perenapryazheniy RD 153-34.3-35.125-99. SPb: , 1999. (Guidelines for the protection of electrical networks 6-1150 kV against lightning and internal overvoltage RD 153-34.3-35.125-99. St. Petersburg: 1999.)
- [6] **G.S. Kuchinskiy**, Tekhnika vysokikh napryazheniy. SPb: Energoatomizdat, 2003. 608 с. (Kuchinskiy G.S. High voltage engineering. St. Petersburg: Energoatomizdat, 2003. 608 p.)
- [7] **V.V. Bazutkin, K.P. Kadomskaya, M.V. Kostenko, Yu.A. Mikhaylov**, Perenapryazheniya v elektricheskikh sistemakh i zashchita ot nikh. SPb: Energoatomizdat, 1995. 320 с. (Bazutkin V.V., Kadomskaya K.P., Kostenko M.V., Mikhailov Y.A. Overvoltage in electrical systems and protection against them. Textbook for universities. St. Petersburg: Energoatomizdat, 1995. 320 p.)
- [8] **I.P. Vereshchagin**, Elektrofizicheskiye osnovy tekhniki vysokikh napryazheniy. M: Izdatelskiy dom MEI, 2010. 704 с. (Vereshchagin I.P. Electrophysical foundations of high voltage engineering. Moscow: Publishing House MEI, 2010. 704 p.)
- [9] Pravila ustroystva elektroustanovok. 7-oye izdaniye, pererabotannoye i dopolnennoye. M: , 2003. (Rules for electrical equipment installation. Moscow: 2003.)
- [10] **S. Gu, W. Chen, J. He, H. Shen, S. Zhang**, Development of surge arresters with series gap against lightning breakage of covered conductors on distribution lines // IEEE Transactions on Power Delivery. 2007. № 4(22). pp. 2191–2198.
- [11] **S. Yokoyama**, Distribution surge arrester behavior due to lightning induced voltages // IEEE Trans. Power Del. 1986. № 1(PWRD-1). pp. 171–178.
- [12] **K. Nakada, S. Yokoyama, T. Yokota, A. Asakawa, T. Kawabata**, Analytical study of failure rates of surge arresters on power distribution lines due to winter lightning // Japan-Korea Joint Symp. Electrical Discharging High Voltage Engineering. 1997. pp. 221–224.
- [13] **Y. Morooka, S. Yokoyama, A. Asakawa**, Protection of power distribution lines against lightning-induced overvoltages by means of surge arresters and overhead ground wire // 8th Int. Symp. High Voltage Engineering. 1993. pp. 397–400.
- [14] **A. Piantini**, Lightning protection of overhead power distribution lines // 29th International Conference on Lightning Protection. 2008. № June. pp. 1–29.
- [15] **F.Kh. Khalilov, E.R. Kotlyarov**, Otkaz ot trosovykh molniyeotvodov i trubchatykh razryadnikov na vozdushnykh liniyakh 35-150 kV v rayonakh Kraynego Severa // Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbPU. Yestestvennyye i inzhenernyye nauki. 2015. № 2(219). pp. 41–47. (Khalilov F.Kh., Kotlyarov E.R. Avoiding

the use of protection wire and tubular rods of 35-150 kV for lightning protection of overhead power lines and substations in conditions of Far North // St. Petersburg Polytechnic University Journal of Engineering Science and Technology. 2015. № 2(219). pp. 41–47.)

[16] IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines IEEE Std. 1410, 1997.

THE AUTHORS

TITKOV Vasily V. – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: titkovprof@yandex.ru

KOLYCHEV Aleksandr V. – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: alkoly4ev@yandex.ru

GULOV Aleksandr M. – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: algu1ov@yandex.ru

Received: 27.06.2021