

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПРОВОДА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ГОЛОЛЕДООБРАЗОВАНИЯ

В. С. Ратушняк

Статья посвящена исследованию динамики провода линий электропередач под воздействием устройства для ударно-встряхивающего предотвращения образования льда. Численные эксперименты проведены при помощи построенной конечно-элементной модели, обладающей максимальной степенью адекватности реальному объекту. В работе продемонстрированы условия возникновения бегущей и стоячей волны при точечном динамическом и квазистатическом воздействии. В ходе исследования получены зависимости амплитуды колебания провода и ускорения движения в 10 см от конца пролета. Эти результаты подтверждают возможность создания высоких ускорений и достаточных амплитуд колебаний для удаления осевшей на провод воды до ее замерзания. Сформулированные в статье рекомендации будут использованы для поиска оптимальных параметров удара, который необходимо генерировать устройству применительно к произвольному пролету с заданными массогабаритными параметрами.

Ключевые слова: динамика провода, конечно-элементная модель, обледенение линий электропередач, индукторная система, бегущая волна, удар, динамическое воздействие.

Состояние вопроса

Проблема обледенения проводов линий электропередач (ЛЭП) является актуальной для стран Европы, Америки, а также для России и Китая. Ударно-вибрационные методы удаления льда, как наиболее энергоэффективные в сравнении с другими [1], представляют особый интерес. В связи с этим известны разработки различных исполнительных механизмов: от ручных инструментов [2] до пневматических приводов [3] и пиропатронов [4]. Принцип работы целого ряда устройств основан на удалении льда под воздействием силы Ампера. В качестве проводников с током используется как пара проводов ЛЭП [5 – 7], так и индукторная система, представляющая собой электромеханический преобразователь [8 – 11]. В статье исследуется воздействие на провод устройства для предотвращения гололедообразования, исполнительным механизмом которого является индукторная система. Задача устройства заключается в удалении воды с провода до ее замерзания. Способ основан на генерации сил между проводом и инертной массой капель путем «встряхивания» провода с небольшой амплитудой относительно его диаметра и с достаточным ускорением [12].

Для определения требований к параметрам работы устройства – силе и времени воздействия, направлению и месту приложения нагрузки – необходимо изучить реакцию провода на удар. Для этого следует построить модель, которая позволит изучить динамическое поведение провода под воздействием точно приложенной нагрузки.

Математическое моделирование удара по металлическому тросу представляет собой нелинейную задачу. Это связано со значительным искажением его формы в процессе деформирования [13]. Одним из эффективных методов изучения динамики

тросов является теория распространения волн. Основополагающие результаты в этой области принадлежат профессору Х. А. Рахматулину. В сороковых годах XX века им были получены основные уравнения движения нити. Рахматулин показал, что форма троса при квазистатическом точечном воздействии отличается от динамического (рис. 1) [14].

Изгиб троса распространяется со скоростью поперечной волны b . Тангенс угла отклонения θ пропорционален скорости удара V , при этом сила F , действующая на отклоняющееся трос тело, может существенно превосходить силу натяжения троса T и будет тем больше, чем больше скорость. Рахматулиным, а также его учениками и последователями, исследована динамика троса при отсутствии натяжения и с заданным натяжением, бесконечного троса и заданной длины, при ударе с неизменной и изменяемой скоростью, то есть телом конечной массы, а также телом заданной формы.

Относительно проводов ЛЭП задача о нагружении периодической равномерно распределенной по пролету поперечной нагрузкой решена в работе [15],

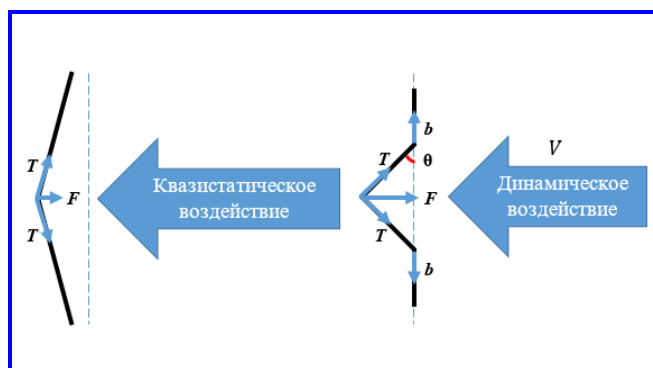


Рис. 1. Схема сил, возникающих при точечном квазистатическом и динамическом воздействии

где используется модель стержня малой изгибной жесткости, свободно опирающегося на несближающиеся опоры. Колебания обледеневших проводов под действием аэродинамических сил подробно изучены в [16]. В работе [17] рассмотрена задача об аэродинамической нагрузке и импульсном нагружении потоком ветра (порыв ветра). Автором [18] разработан метод вычисления конечной линии равновесия стального стержня после удара при больших отклонениях от первоначального равновесного состояния. В работе [19] приведено решение задачи распространения волн и колебаний в тяжелых канатах.

Тем не менее в предыдущих работах не был исследован боковой удар по весоному тросу присоединенным телом в направлении, перпендикулярном действию силы тяжести. Кроме этого, не исследовалась динамика троса с учетом возвратного движения ударяющего тела.

Постановка задачи

Устройство для предупреждения образования наледи на проводах ЛЭП при боковом способе крепления размещается исполнительной частью между фазными проводами (рис. 2). Конструкция устройства включает в себя индукторную систему (индуктор и боек), накопитель энергии и другие функциональные блоки, размещаемые в корпусе, покрытом защитным гофрированным кожухом. Боек в исходном состоянии плотно прижат к индуктору при помощи возвратной пружины. Штанги из изоляционного материала закрепляются одним концом в корпусе бойка/индуктора, другим концом – на проводах. Все эти детали в совокупности составляют общую массу устройства.

В результате разряда накопителя энергии на индукторную систему боек и индуктор отталкиваются друг от друга с начальной скоростью V_0 , которая зависит от электрических и массогабаритных параметров устройства. Посредством штанг на провода передается удар от индукторной системы (присоединенного тела конечной массы). Будем рассматривать провод ЛЭП как гибкую линейно-упругую весоную нить с линейной плотностью ρ , подразумевая при этом, что напряжения, возникающие в ней в любой момент времени, направлены по касательной к её мгновенному профилю, то есть нить не сопротивляется изгибу. Нить длиной L жестко закреплена на концах, то есть смещениями ее концов можно пренебречь, имеет натяжение T , незначительно превышающее вес нити, равномерно распределенный по всей длине, за счет чего она провисает по некоторой кривой, подчиняясь растя-

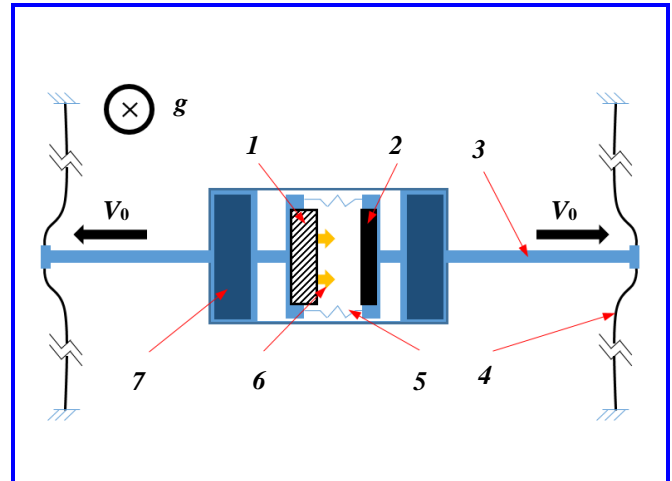


Рис. 2. Расчетная схема устройства (вид сверху):
 1 – индуктор; 2 – боек; 3 – штанга; 4 – провод ЛЭП;
 5 – возвратная пружина; 6 – сила Ампера;
 7 – функциональный блок

жению по закону Гука. Задачу для определения поперечных составляющих реакции провода на удар присоединенным телом конечной массы с начальной скоростью V_0 до момента падения скорости до нуля сформулируем следующим образом (1):

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = b \frac{\partial^2 u}{\partial x^2};$$

$$u(-L_1, t) = 0; \quad (1)$$

$$u(L_2, t) = 0;$$

$$u(x, 0) = 0;$$

$$\frac{\partial u}{\partial t}(x, 0) = 0;$$

$$u(\pm \delta, t) = \int_0^{t_1} v(t) dt,$$

где b – скорость распространения поперечных колебаний, равная (2):

$$b = \sqrt{\frac{N}{p}}, \quad (2)$$

где p – погонный вес провода; N – натяжение. Собственная частота колебаний n -й гармоники (3):

$$v_n = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{N}{\rho}}. \quad (3)$$

Решение данной задачи традиционными методами математической физики дано в работе [19]. Дальнейшее движение провода обусловлено действием возвратной пружины устройства. Решение, полученное на предыдущем шаге, служит начальным условием для движения в обратную сторону (4):

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} &= \frac{T}{\rho} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2}; \\ U(-L_1, t) &= 0; \\ U(L_2, t) &= 0; \\ U(x, 0) &= u(x, t_1); \\ \frac{\partial U}{\partial t}(x, 0) &= \frac{\partial u}{\partial t}(x, t_1); \\ u(\pm \delta, t) &= \int_{t_1}^{t_2} V(t) dt. \end{aligned} \quad (4)$$

Незамерзшая капля воды удерживается на проводе за счет силы поверхностного натяжения. Удаление капли происходит под действием силы инерции, которая зависит от ускорения и массы капли. Считая, что длина перемещения должна быть не меньше диаметра капли воды, ключевым параметром для удаления воды с провода является ускорение, с которым он перемещается под воздействием удара устройства.

$$\begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ T_x \\ T_y \\ T_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{22} & 0 & 0 & 0 & K_{26} \\ 0 & 0 & K_{33} & 0 & K_{35} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{53} & 0 & K_{55} & 0 \\ 0 & K_{62} & 0 & 0 & 0 & K_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x-L \\ y \\ z \\ a \\ b \\ c \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{21} & c_{31} & c_{41} & c_{51} & c_{61} \\ c_{21} & c_{22} & c_{32} & c_{42} & c_{52} & c_{62} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{43} & c_{53} & c_{63} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & c_{54} & c_{64} \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{54} & c_{55} & c_{65} \\ c_{61} & c_{62} & c_{63} & c_{64} & c_{65} & c_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{Bmatrix},$$

Метод решения и допущения

Определение динамики провода под воздействием присоединенного к нему устройства является сложной задачей, требующей учета многих факторов: натяжения провода и его веса, массы устройства, ширины зацепления с проводом, сопротивления возвратных пружин. Кроме этого, в системах (1) и (4) законы изменения скоростей $v(t)$ и $V(t)$ не определены. Известно, что для аналитических методов, позволяющих получить точные решения, сложность анализа иногда многократно возрастает при вариациях исходных данных [20], поэтому для решения поставленной задачи целесообразно применить приближенные численные методы.

Для численных исследований реакции провода на удар выбрана конечно-элементная модель стержня Эйлера – Бернулли в нелинейной постановке, реализованная в коммерческом программном продукте кинематического анализа Adams (Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems) компании MSC.Software (США). Данная модель, в отличие от линейной модели стержня Тимошенко [21], за счет дополнительных членов в уравнениях силы/крутящего момента помогает стабилизировать численное решение:

$$\begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ T_x \\ T_y \\ T_z \end{Bmatrix} = \{F_0\} - N \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 6/5L & 0 & 0 & 0 & -1/10 \\ 0 & 0 & 6/5L & 0 & 1/10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/10 & 0 & 2L/15 & 0 \\ 0 & -1/10 & 0 & 0 & 0 & 2L/15 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x-L \\ y \\ z \\ a \\ b \\ c \end{Bmatrix},$$

где $N = K_{11}(x - L) + d$ – осевая сила стержня; d – вязкое демпфирование; $\{F_0\}$ – силы и крутящий момент I -го узла, вычисленные по линейной модели стержня Тимошенко:

где x, y, z – поступательные смещения I -го узла относительно J -го узла, измеренные в системе координат J -го узла; a, b, c – относительные смещения вращения I -го узла относительно J -го узла, выраженные соответственно по осям x, y, z J -го узла; F_x, F_y, F_z и T_x, T_y, T_z – компоненты поступательной силы и силы вращения (крутящего момента) в системе координат J -го узла; L – недеформированная длина балки вдоль оси x ; V_x, V_y, V_z – производные по времени от x, y, z соответственно; $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – компоненты угловой скорости I -го узла относительно J -го узла, видимой J -м узлом и измеренной в системе координат J -го узла; K_{ij}, c_{ij} – элементы матриц жесткости и демпфирования, обе матрицы являются симметричными.

Элемент провода представляет собой пару твердых тел, обладающих распределенной по объему массой и инерцией. Они связаны упругими соединениями и силами, благодаря чему реализуется продольная жесткость, жесткость на изгиб и скручивание (рис. 3).

Модель характеризуется рядом параметров. Шаг дискретизации (количество элементов на метр) определяется из расчета минимум пяти элементов на минимальную длину волны. Коэффициенты осевой жесткости R_{kx} , изгибной R_{kb} и крутильной R_{kt} лежат в области $R_{kx} > 1$, $R_{kb} \ll 1$ и $R_{kt} < 1$, за счет чего обеспечивают требуемую стрелу провеса при заданном тяжении. Коэффициент демпфирования D_p задает корректное значение собственной частоты колебаний.

Проведенная верификация модели [22] позволяет ожидать, что ее применение для решения задачи динамики провода обосновано и приведет к адекватным результатам.

Результаты

Численные исследования динамики провода под воздействием устройства проведены на уменьшенной модели пролета длиной 7 м. Построена численная модель витого провода из высокоуглеродистой оцинкованной стали погонным весом 0,012 кг/м, площадью поперечного сечения 1,52 мм², диаметром 1,39 мм, модулем Юнга 189,9 ГПа. Проведены численные эксперименты для двух стрел провеса: 14,33 и 29,33 мм, при этом тяжение в пролете составило 49 и 24 Н соответственно. Скорость распространения поперечных колебаний, вычисленная по формуле (2), составила 63,9 м/с для тяжения 49 Н и 44,72 м/с – для 24 Н. Откуда собственная частота первой гармоники, вычисленная по формуле (3), равна 4,56 Гц для тяжения 49 Н и 3,19 Гц для тяжения 24 Н. Заданы параметры модели провода:

шаг дискретизации 29 элементов/метр, что позволит получить достаточно точное решение для малой длины волны от 0,17 м; коэффициенты жесткости $R_{kx} = 1$, $R_{kb} = R_{kt} = 1$; коэффициент демпфирования $D_p = 0,05$ обеспечивает соответствие аналитически полученного значения собственной частоты колебаний 1-й гармоники с численным значением, полученным для модели провода в Adams при помощи быстрого преобразования Фурье 3,11 для тяжения 24 Н и 4,55 Гц для тяжения 49 Н. Граничные условия соответствуют шарнирному креплению концов провода, то есть провод может крутиться вокруг оси крепления.

Относительная масса устройства – 1/20 массы провода в пролете, ширина контакта с проводом – 10 мм, коэффициент упругости возвратной пружины устройства – 147,099 Н/м. Модель провода с закрепленным на нем устройством, являющимся источником воздействия, приведена на рис. 4.

Поскольку устройство толкает провод под воздействием импульсно возрастающей и затем убывающей силы с максимальным значением F_z , действующей на индукторную систему устройства в течение времени Δt , решено исследовать динамику провода в зависимости от импульса силы:

$$I_z = F_z \Delta t.$$

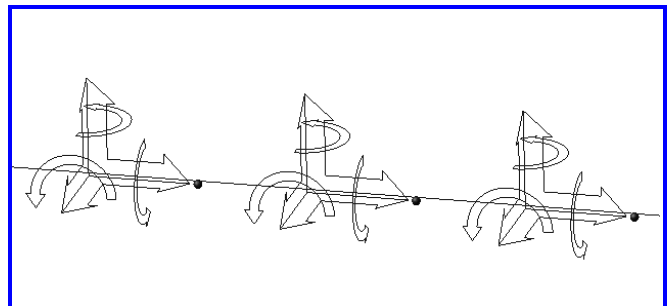


Рис. 3. Дискретная модель провода

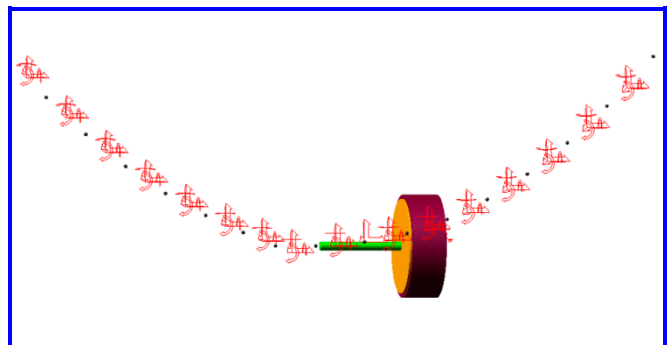


Рис. 4. Модель индуктора на проводе

Исследовалась амплитуда отклонения провода в области $\frac{1}{4}$ пролета, где возможны максимальные отклонения. Также исследовались амплитуда отклонения и ускорение в области 10 см от концов пролета, что соответствует принятому радиусу распространения эффективного воздействия устройства. На рис. 5 представлено семейство кривых для импульсов силы 0,2, 0,25 и 0,3 Н·с. На рис. 6 приведено сравнение динамики и тяжения провода со стрелой провеса 14,33 мм при ударе 0,3 Н·с (2,5 мс, 120 Н) и 3 Н·с (25 мс, 120 Н).

Анализ результатов

Проведенные конечно-элементные расчеты показали, что в широком диапазоне времен и сил ударов, которые можно рассматривать как возможные для генерации устройством (от 8 Н до 12 кН, от 25 мкс до 25 мс), при постоянном импульсе силы с сокра-

щением времени удара и, соответственно, возрастом силы удара наблюдается рост амплитуды колебаний по всей длине пролета. Максимальное ускорение также возрастает. При одних и тех же воздействиях для большей стрелы провеса амплитуда колебаний больше, а ускорение – меньше. В диапазоне времен удара 250 – 2500 мкс изменения по всем рассматриваемым показателям незначительны, при увеличении времени удара до 25 мс наблюдается их спад в 1,5 – 2 раза. При увеличении импульса силы динамика провода меняется с бегущей волны, характерной для динамического точечного воздействия, на стоячую волну, характерную для квазистатического точечного воздействия. При этом на порядок возрастает скачок тяжения и амплитуда отклонения. Очевидно, увеличив коэффициент упругости возвратной пружины, можно снизить эти показатели, однако коэффициент полезного действия устройства при этом также снизится.

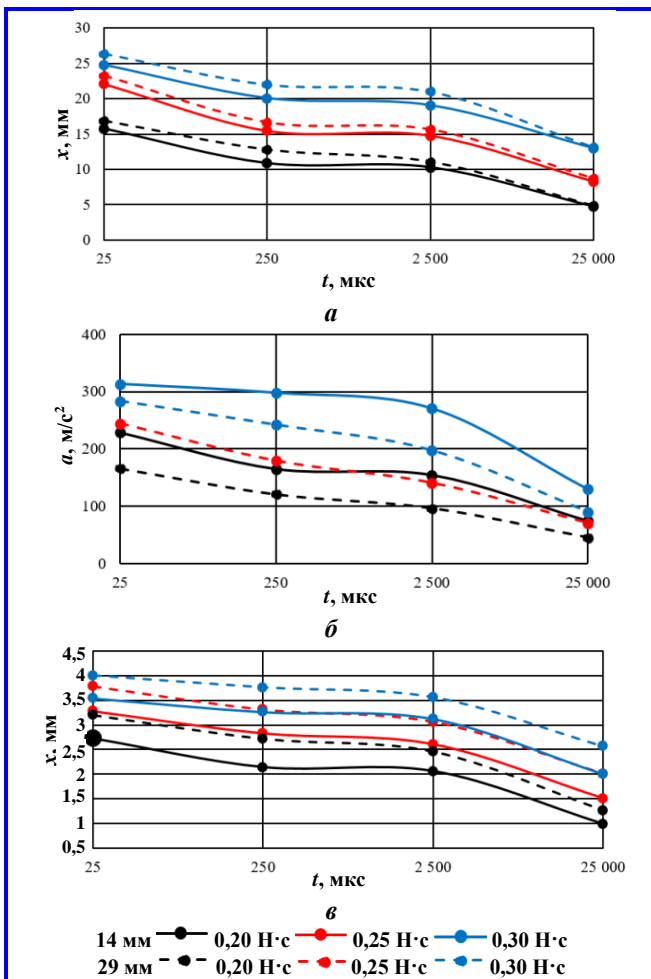


Рис. 5. Результаты расчетов: а – амплитуда отклонения, $\frac{1}{4}$ пролета; б – максимальное ускорение, 10 см от конца пролета; в – амплитуда отклонения, 10 см от конца пролета

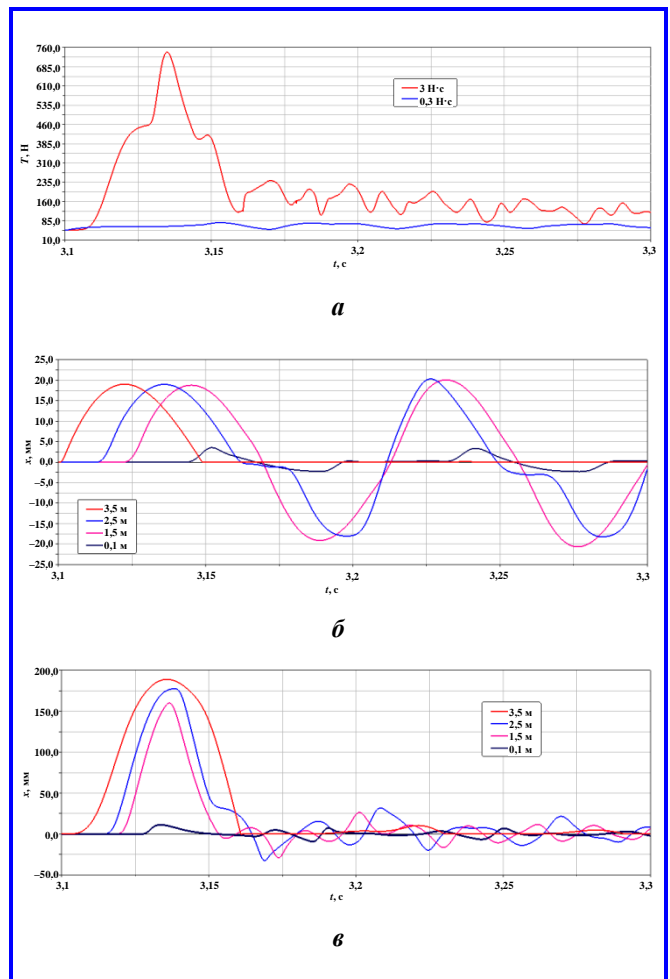


Рис. 6. Сравнение ударов 0,3 Н·с (2,5 мс, 120 Н) и 3 Н·с (25 мс, 120 Н): а – тяжение; б – динамика провода при ударе 0,3 Н·с; в – динамика провода при ударе 3 Н·с

Полученные зависимости позволяют сделать вывод о том, что ускорение движения провода и амплитуда колебаний нелинейно зависят от импульса силы. Амплитуды колебаний при исследуемых ударах составляют не менее 1 мм, что является достаточным для удаления капель воды того же диаметра. Для создания необходимого ускорения можно использовать один из способов: сокращать время удара с сохранением импульса силы – данное изменение может дать прирост ускорения порядка 50 м/с^2 при сокращении времени на порядок, либо сохраняя длительность удара давать прирост силы, то есть увеличивать импульс силы. В этом случае необходимо увеличивать коэффициент жесткости возвратной пружины, чтобы не допускать чрезмерно больших амплитуд колебаний, в противном случае возникает опасность значительных скачков натяжения, что может привести к повреждению провода вплоть до его обрыва.

Выводы

Динамика провода при воздействии ударного устройства исследована при помощи разработанной и верифицированной численной модели. Данный вопрос является актуальным, потому что для решения задачи о выборе оптимальных параметров удара устройства для удаления осевшей на провод воды применим только численный подход в силу высокой сложности постановки задачи. Проведенный анализ динамики провода в диапазоне сил 8 Н – 12 кН и времен 25 мкс – 25 мс при соответствующих импульсах силы 0,2 – 0,3 Н·с, позволили сделать вывод о том, что короткие удары создают малые амплитуды колебаний и высокие ускорения, что является наиболее безопасным для ЛЭП и может позволить удалить осевшую на провод воду.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90188.

Литература

1. Espinoza E. H. Principle of functioning of smart solution to clean high power lines in cold climate : master's thesis in Industrial Engineering / Edison Hover Caicedo Espinoza ; The Arctic University of Norway. – 2018 – 75 p.
2. Systems for prediction and monitoring of ice shedding, anti-icing and de-icing for power line conductors and ground wires // CIGRE Working Group. – Cigré, Paris, France, 2010. – B2.29. – 100 p.
3. Patent № 2207152 Canada, H02G7/16. Apparatus for deicing overhead wires and cables : announced 22.05.1997 : publication 22.11.1998 / J. L. Laforte, M. A. Allaire. – 1998.
4. Leblond A. Development of a portable de-icing device for overhead ground wires / A. Leblond // The 11th Int. workshop on atmospheric icing of structures. – 2005. – P. 399 – 404.
5. Патент № 2442256 Российская Федерация, МПК H02G 7/16(2006.01). Способ удаления обледенения с проводов линий электропередач : № 2010144485/07 : заявл. 29.10.2010 : опубл. 10.02.2012 / В. М. Козин, В. А. Соловьев, Д. А. Орлов, С. И. Сухоруков, К. С. Малых ; Бюл. изобрет. – 2012. – № 4. – 4 с.
6. Патент № 2166826 Российская Федерация, МПК H02G 7/16(2006.01), B60M 1/12(2006.01). Способ удаления гололеда с проводов контактной сети и линий электропередачи : № 99114706/09 : заявл. 05.07.1999 : опубл. 10.05.2001 / А. В. Ефимов, А. Г. Галкин. – 2001. – 5 с.
7. De-icing EHV Overhead Transmission Lines by Short-circuit Currents / M. Landry, R. Beauchemin, A. Venne // IEEE Canadian Review. – 2001. – P. 10 – 14.
8. An Investigation of Power Line De-Icing by Electro-Impulse Methods / R. I. Egbert, R. L. Scharag, W. D. Bernhart [et al.] // IEEE Power & Energy Society. – 1989. – № 4 (3). – P. 1855 – 1861.
9. Патент № 2446532 Российская Федерация, МПК H02G 7/16(2006.01). Способ удаления льда и снега с проводов и грозозащитных тросов линий электропередачи и устройство для его осуществления : № 2012124475/07 : заявл. : 14.06.2012 : опубл. 20.12.2012 / Е.Н. Иванов ; Бюл. изобрет. – 2012. – № 9. – 1 с.
10. Авторское свидетельство № 615560, МПК H02G 7/16(2006.01). Устройство для удаления льда : № 2453239 : заявл. 15.02.1977 : опубл. 15.07.1978 / И. А. Левин, А. И. Кульчицкий, Н. Н. Ершов, М. Б. Улановский ; Бюл. изобрет. – 1978. – № 26. – 2 с.
11. Практическая реализация линейных импульсных электромеханических преобразователей в промышленных устройствах / В. Ф. Боллох, С. В. Олексенко, И. С. Шукин // Вестник НТУ «ХПИ». – 2016. – № 11 (1183). – С. 55 – 63.
12. Патент № 2666754 Российская Федерация, МПК H02G 7/16 (2006.01). Способ и устройство для удаления наледи с проводов линий электропередачи : № 2017136405 : заявл. 16.10.2017 : опубл. 12.09.2018 / В. С. Ратушняк, А. В. Юрьев, Е. С. Ильин, И. С. Трухина, В. С. Ратушняк ; заявитель ООО «НПП «СибТранс-Наука» ; Бюл. изобрет. – 2018. – № 26. – 6 с.
13. Беленя Е. И. Металлические конструкции : спецкурс : учеб. пособие для вузов / Е. И. Беленя, Н. Н. Стрелецкий, Г. С. Ведеников [и др.] ; под общ. ред. Е. И. Беленя. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Стройиздат, 1991. – 687 с.
14. Рахматулин Х. А. Прочность и разрушение при кратковременных нагрузках / Х. А. Рахматулин, Е. И. Шемякин, Ю. А. Демьянов [и др.]. – Москва : Университетская книга; Логос, 2008. – 618 с.
15. Сухоруков С. И. Автоматизированная система удаления льда с проводов ЛЭП : специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Сергей Иванович Сухоруков ; Комсомольск-на-Амуре гос. техн. ун-т. – Комсомольск-на-Амуре, 2016. – 220 с. : ил.

16. Нелинейные колебания и галомирование провода с обледенением / Ф. Н. Шклярчук, А. Н. Данилин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2013. – № 11. – С. 188 – 197.
17. Применение геометрически нелинейных уравнений стержня к расчету статики и динамики тросов. Ч. 2 / Н. В. Пустовой, В. Е. Левин, Д. А. Красноулицкий // Научный вестник НГТУ. – 2012. – № 2 (47). – С. 127 – 136.
18. Тарасов Д. А. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния стальных канатов при действии поперечных статических и ударных нагрузок : специальность 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Тарасов Денис Александрович ; ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет». – Пенза, 2016. – 146 с.
19. Малашин А. А. Взаимовлияние волновых и колебательных процессов в предварительно напряженных элементах и системах : специальность 01.02.04 «Механика деформируемого твердого тела» : диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук / Малашин Алексей Анатольевич : МГУ имени М. В. Ломоносова. – Москва, 2011. – 211 с.
20. Меркин Д. Р. Введение в механику гибкой нити / Д. Р. Меркин. – Москва : Наука, 1980. – 240 с.
21. Przemieniecki J. S. Theory of matrix structural analysis / J. S. Przemieniecki. – New-York : McGraw-Hill, 1968. – 468 с.
22. The Numerical Studies of the Reaction of the Overhead Transmission Lines to a Transverse Impact by Shaking Off Water Droplets / V. S. Ratushnyak, A. V. Livshits, N. O. Epihina // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – Sochi, 2020. – P. 1 – 6.

Поступила в редакцию 02.10.2020

*Валентина Сергеевна Ратушняк, аспирант, e-mail: ratushnyak_vas@krsk.irkgups.ru.
(Иркутский государственный университет путей сообщения).*

INVESTIGATION OF THE DYNAMICS OF A POWER TRANSMISSION LINE UNDER THE INFLUENCE OF A DEVICE TO PREVENT ICE FORMATION

V. S. Ratushnyak

The article is devoted to the study of the dynamics of a power line wire under the influence of a device for shock-shaking prevention of ice formation. Numerical experiments were carried out using the constructed finite element model, which has the maximum degree of adequacy to the real object. The paper demonstrates the conditions for the occurrence of a traveling and standing wave under a point dynamic and quasi-static action. In the course of the study, the dependences of the vibration amplitude of the wire and the acceleration of movement in 10 cm from the end of the span were obtained. These results confirm the possibility of creating high accelerations and sufficient vibration amplitudes to remove water that has settled on the wire before it freezes. The recommendations formulated in the article will be used to find the optimal impact parameters, which must be generated by the device in relation to an arbitrary flight with given mass and dimensional parameters.

Key words: wire dynamics, finite element model, ice shedding overhead transmission lines, inductor system, traveling wave, shock, dynamic action.

References

1. Principle of functioning of smart solution to clean high power lines in cold climate : master's thesis in Industrial Engineering / E. H. Espinoza. – Edison Hover Caicedo Espinoza ; The Arctic University of Norway. – 2018 – 75 p.
2. Systems for prediction and monitoring of ice shedding, anti-icing and de-icing for power line conductors and ground wires // CIGRE Working Group. – Cigré, Paris, France, 2010. – B2.29. – 100 p.
3. Patent No. 2207152 Canada, H02G7/16. Apparatus for deicing overhead wires and cables : announced 22.05.1997 : publication 22.11.1998 / J. L. Laforte, M. A. Allaire. – 1998.
4. Development of a portable de-icing device for overhead ground wires / A. Leblond // The 11th Int. workshop on atmospheric icing of structures. – 2005. – Pp. 399 – 404.
5. Patent No. 2442256 Russian Federation, IPC H02G 7/16(2006.01). Method of de-icing power line wires : No. 2010144485/07 : appl. 29.10.2010 : publ. 10.02.2012 / V. M. Kozin, V. A. Soloviev, D. A. Orlov, S. I. Sukhorukov, K. S. Malykh ; Bul. of inventions. – 2012. – No. 4. – 4 p.
6. Patent No. 2166826 Russian Federation, IPC H02G 7/16(2006.01), B60M 1/12(2006.01). Method of de-icing overhead wires and power lines : No. 99114706/09 : appl. 05.07.1999 : publ. 10.05.2001 / A. V. Efimov, A. G. Galkin. – 2001. – 5 p.
7. De-icing EHV Overhead Transmission Lines by Short-circuit Currents / M. Landry, R. Beauchemin, A. Venne // IEEE Canadian Review. – 2001. – Pp. 10 – 14.

8. An Investigation of Power Line De-Icing by Electro-Impulse Methods / R. I. Egbert, R. L. Scharag, W. D. Bernhart [et al.] // IEEE Power & Energy Society. – 1989. – № 4 (3). – Pp. 1855 – 1861.
9. Patent No. 2446532 Russian Federation, IPC H02G 7/16(2006.01). Method of removing ice and snow from wires and overhead ground-wire cables of power lines and device for its implementation : No. 2012124475/07 : appl. : 14.06.2012 : publ. 20.12.2012 / E. N. Ivanov ; Bul. of inventions. – 2012. – No. 9. – 1 p.
10. Inventor's Certificate No. 615560, IPC H02G 7/16(2006.01). De-icing device : No. 2453239 : appl. 15.02.1977 : publ. 15.07.1978 / I. A. Levin, A. I. Kulchitskii, N. N. Ershov, M. B. Ulanovskii ; Bul. of inventions. – 1978. – No. 26. – 2 p.
11. Practical implementation of electro-mechanical linear pulse converters in industrial devices / V. F. Boliukh, S. V. Oleksenko, I. S. Shchukin // Bulletin of Kharkiv Polytechnic Institute. – 2016. – No. 11 (1183). – Pp. 55 – 63.
12. Patent No. 2666754 Russian Federation, IPC H02G 7/16 (2006.01). Method and device for de-icing power line wires : No. 2017136405 : appl. 16.10.2017 : publ. 12.09.2018 / V. S. Ratushnyi, A. V. Iurev, E. S. Ilin, I. S. Trukhina, V. S. Ratushnyi ; applicant JSC 'NPP 'SibTransNauka' ; Bul. of inventions. – 2018. – No. 26. – 6 p.
13. Metallic structures : special course of studies : textbook for higher educational institutions / E. I. Belenia, N. N. Strel'tskii, G. S. Vedenikov [et al.] ; under general editorship of E. I. Belenia. – 3rd ed., revised and enlarged. – Moscow : Stroyizdat, 1991. – 687 p.
14. Strength and destruction under short-term loads / Kh. A. Rakhmatulin, E. I. Shemiakin, Iu. A. Demianov [et al.]. – Moscow : University Book; Logos, 2008. – 618 p.
15. Automatic system for de-icing power line wires : specialty 05.09.03 'Electrotechnical complexes and systems' : Thesis for the Degree of Candidate of Technical Sciences / Sergei Ivanovich Sukhorukov ; Komsomolsk-on-Amur State Technical University. – Komsomolsk-on-Amur, 2016. – 220 p. : with figures.
16. Non-linear oscillations and galloping of ice-covered wire / F. N. Shkliarchuk, A. N. Danilin // News of the Tula State University. Technical Sciences. – 2013. – No. 11. – Pp. 188 – 197.
17. Application of geometrically non-linear core equations in calculation of statics and dynamics of cables. Part 2 / N. V. Pustovoi, V. E. Levin, D. A. Krasnorutskii // Science Bulletin of the Novosibirsk State Technical University. – 2012. – No. 2 (47). – Pp. 127 – 136.
18. Mathematical modelling of strain-stress behavior of steel ropes under lateral static and impact loads : specialty 05.13.18 'Mathematical modelling, numeric methods and software systems' : Thesis for the Degree of Candidate of Technical Sciences / Tarasov Denis Aleksandrovich ; Penza State Technological University. – Penza, 2016. – 146 p.
19. Mutual influence of wave and oscillating processes in prestressed elements and systems : specialty 01.02.04 'Deformable solid body mechanics' : Thesis for the Degree of Doctor of Physics and Mathematics / Malashin Aleksei Anatolevich : Lomonosov Moscow State University. – Moscow, 2011. – 211 p.
20. Introduction to ideal cable mechanics / D. R. Merkin. – Moscow : Nauka (Science), 1980. – 240 p.
21. Theory of matrix structural analysis / J. S. Przemieniecki. – New-York : McGraw-Hill, 1968. – 468 p.
22. The Numerical Studies of the Reaction of the Overhead Transmission Lines to a Transverse Impact by Shaking Off Water Droplets / V. S. Ratushnyi, A. V. Livshits, N. O. Epihina // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – Sochi, 2020. – Pp. 1 – 6.

*Valentina Sergeevna Ratushnyak, Ph. D. Student, e-mail: ratushnyak_vas@krsk.irkups.ru.
(Irkutsk State University of Railway Transport).*