

О границах применимости теории колебания струны при оценке конфигурации проводов линии электропередачи в процессе полуволновой "пляски"

¹**ДЖАМАНБАЕВ Мураткали Абенович**, к.ф.-м.н., ассоциированный профессор, dzhamanbaev@mail.ru,

¹***ЖУМАХАН Нуржан Бейбитулы**, магистр, ассистент, Nurzhan_14_95@mail.ru,

¹**ИЛЬЯСОВ Ержан Сейтович**, магистр, ассистент, ilyassov.yerzhan@mail.ru,

¹Алматинский технологический университет, Казахстан, Алматы, ул. Толе би, 100,

*автор-корреспондент.

Аннотация. При изучении резонансных явлений в токоведущих проводах некоторыми авторами предполагается, что конфигурация (форма) провода при полуволновой пляске соответствует синусоиде и в качестве координатной функции используется синусоидальный закон. При синусоидальном законе все сечения провода в пределах полуволны имеют одинаковое направление движения, одновременно проходят нейтральное положение и достигают крайних верхних и нижних положений. Однако наблюдения за колебательным процессом провода на анкерном пролете линии электропередачи показали, что при слабых механических напряжениях характер колебания провода существенно отличается от вышеизложенного. Отличие заключается в том, что в пределах пролета возникают дополнительные узлы колебания. Перемещения провода между узлами происходят в противофазе (краевые эффекты), напоминая трехполуволновые колебания, только с разными длинами полуволн. Координаты подвижных узлов, как показывают наблюдения и расчеты, зависят от начального механического напряжения провода, длины пролета и марки провода. В связи с этим возникает вопрос о выявлении применимости синусоидального закона для описания конфигурации проводов в процессе полуволновой пляски и, как следствие, применение теории колебания струны для исследования явлений «пляски». Представлены результаты экспериментальных данных по выявлению конфигураций провода при полуволновых колебаниях. Получена расчетная формула критического напряжения провода, при котором наблюдаются краевые эффекты. В конце статьи приводятся соответствующие выводы.

Ключевые слова: надежность электроснабжения, повреждение проводов, линия электропередачи, анкерный пролет, пляска проводов, конфигурация провода, краевые эффекты, критическое напряжение.

Введение

Передача электроэнергии по воздушным линиям электропередач по сей день остается самым дешевым способом передачи электроэнергии. В то же время, линии электропередачи являются наименее надежными элементами систем электроснабжения. Аварийные отключения воздушных линий электропередачи, связанные с гололедно-ветровыми нагрузками (в том числе пляски проводов), относятся к числу наиболее тяжелых и могут дезорганизовать электроснабжение больших экономических районов.

Явление пляски, представляющее собой колебания проводов и тросов линий электропередачи, возникает обычно при ветре и отложении на проводах гололеда. Особенностью пляски являются значительная амплитуда колебания (1-3 м и более) и низкая частота 0,2...1,2 Гц [1-3,5]. Пляска проводов приводит к схлестыванию проводов с

тросом и короткому замыканию. При пляске также возникают значительные динамические усилия во всех элементах ВЛ, наблюдаются повреждения проводов, линейной арматуры, изоляторов и самих опор [2-4]. Поэтому для обеспечения надежной работы ВЛ необходимо обеспечивать ее защиту от пляски проводов различными устройствами (гасители пляски).

Пляска проводов как фактор, снижающий надежность электроснабжения, исследуется давно, однако до настоящего времени еще не получила окончательного решения. Для изучения явлений пляски используются как экспериментальные (на опытных полигонах), так и теоретические методы. Основная цель разработки теоретических вопросов заключается в составлении общей математической модели, позволяющей при заданных условиях определить главные параметры колебательного процесса – амплитуду и частоту. При

разработке математической модели в ряде случаев предполагается, что конфигурация провода при пляске соответствует синусоиде, а каждая точка провода совершает гармонические колебания [1]. Однако такого рода допущения требуют обоснование, то есть возникает необходимость выявления границы применимости синусоидального закона для анализа явлений пляски проводов. Одним из вариантов решения задачи является видеофиксация колебательных процессов и подробный анализ видеоматериалов. Другой вариант – визуальные наблюдения за колебательными процессами и выявление нарушений некоторой характерной особенности, присущей форме полуволновой пляске.

Краевые эффекты, наблюдаемые при полуволновых колебаниях проводов на анкерном пролете

Известно, что при достаточно больших начальных натяжениях все сечения провода (струны) в пределах полуволны имеют одинаковые направления движения, одновременно проходят зону максимальных скоростей (нейтральное положение) и достигают одновременно крайних верхних и нижних положений (рисунок 1).

Как показывают наблюдения за колебательными процессами при относительно слабых натяжениях провода, форма провода при колебаниях имеет сложный характер. Концевые участки провода (прилегающие к опорам) перемещаются в противоположных направлениях по отношению к средней части участка провода. По этой причине в анкерном пролете образуются дополнительные узлы колебания, делящие провод на три неравных участка (рисунок 2). Причем координаты узла колебания z изменяются в зависимости от величины начального натяжения (механического напряжения σ_0) провода.

С целью выявления зависимости $z = f(\sigma_0)$ были проведены эксперименты. Представленные ниже экспериментальные результаты получены на Талапкерской экспериментальной базе, относящиеся к Казахскому научно-исследовательскому институту энергетики им. академика Ш.Ч. Чокина.

Эксперименты проводились для пролетов

длиной $\ell = 120$, 288 и $\ell = 354$ м. При этом для пролета длиной $\ell = 120$ м соответствует провод типа АС-240/32 со следующей характеристикой: $E = 7880$ ДаН/мм², $F = 275,7$ мм², $P_0 = 0,921$ ДаН/м. Для пролетов $\ell = 288$ и 354 м соответствует провод типа АС-300/39 со следующей характеристикой: $E = 7700$ ДаН/мм², $F = 339,6$ мм², $P_0 = 1,132$ ДаН/м. При экспериментах размах колебания не превышал полметра. Такое ограничение продиктовано рельефом местности.

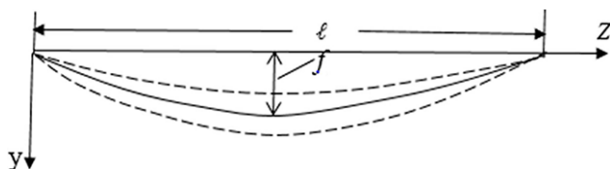
Экспериментальные данные приведены на рисунке 3. Как следует из рисунка, характер зависимости $z = f(\sigma_0)$ нелинейный. По мере увеличения механического напряжения провода координата узловых точек z уменьшается и при достижении напряжения до некоторого критического значения вовсе исчезает, и все точки провода совершают однонаправленные (синхронные) движения.

Таким образом, в области малых напряжений форма полуволновых колебаний напоминает трехполуволновую с той разницей, что длина полуволн неодинакова и с изменением начального напряжения провода разница между длинами полуволн также изменяется.

Оценка критического напряжения, при котором наблюдаются краевые эффекты

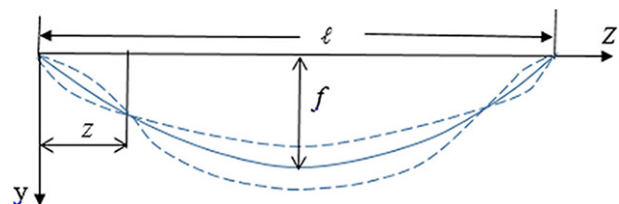
Оценка критического механического напряжения производится исходя из следующего соображения. С уменьшением начального натяжения (с увеличением стрелы провеса) длина провода увеличивается, а упругое удлинение (деформация) от собственного веса уменьшается. В некотором критическом натяжении можно полагать, что провод ведет себя как нерастяжимая нить. Опираясь на такое предположение, ниже приводится методика определения критического напряжения провода, при котором имеет место краевой эффект.

При расчетах принято, что начальная кривая провисания провода в пролете описывается параболой. Такое допущение оправдано для пролетов, длина которых $\ell < 800$ м [6]. Предполагаем, что провод перемещаясь, из состояния статического равновесия занял горизонтальное положение (рисунок 1). Изменение энергии деформации



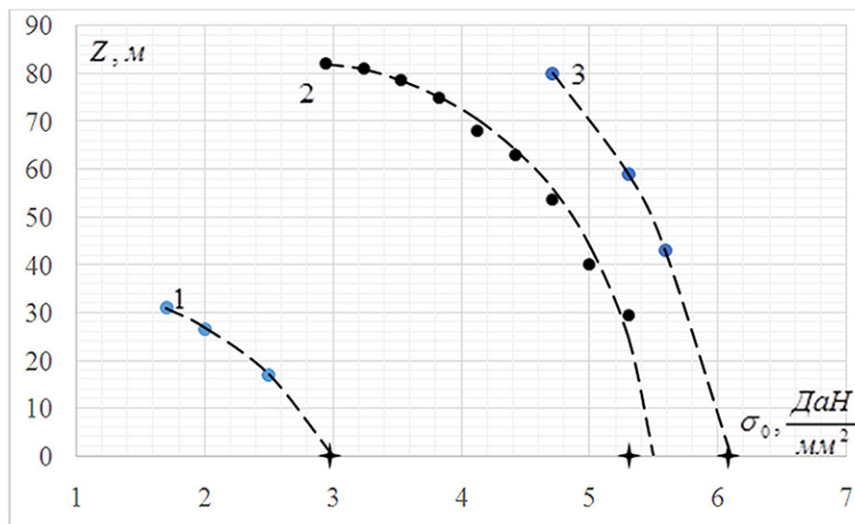
Сплошная линия – нейтральное положение (положение статического равновесия), пунктирные линии – отклонение от нейтрального положения, ℓ – длина пролета, f – стрела провеса провода

Рисунок 1 – Колебание провода на анкерном пролете с полуволной при больших натяжениях



Сплошная линия – положение статического равновесия, пунктирные линии – отклонение от положения статического равновесия, z – координата узла колебания

Рисунок 2 – К пояснению краевого эффекта



● – экспериментальные точки, + – критические напряжения, пунктирная линия – линии экстраполяции.
1 – $\ell = 120$ м, 2 – $\ell = 288$ м, 3 – $\ell = 354$ м

Рисунок 3 – Изменения координаты узла колебания z в зависимости от начального напряжения провода

провода E_d в этом случае определяется площадью трапеции $\ell T_\ell T_0 L_0$ (рисунок 4)

$$E_d = \frac{T_0 + T_\ell}{2} (L_0 - \ell). \quad (1)$$

Энергию деформации можно выразить через разности длин проводов, если использовать следующее выражение (закон Гука)

$$T_0 - T_\ell = \frac{EF}{l} (L_0 - \ell), \quad (2)$$

где E – модуль упругости, F – площадь поперечного сечения провода.

Из выражения (1) и (2) исключив T_ℓ , получим

$$E_d = T_0 (L_0 - \ell) - \frac{EF}{2l} (L_0 - \ell)^2. \quad (3)$$

В формуле (3) длина провода в состоянии равновесия определяется по формуле [4]

$$L_0 = l_0 + \frac{8f^2}{3l} = l + \frac{p_0^2 l^3}{24T_0^3}, \quad (4)$$

откуда

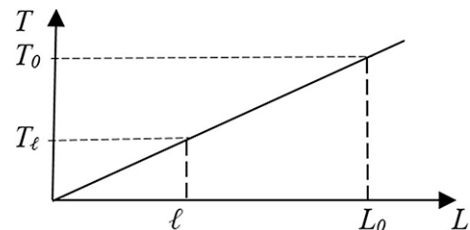
$$L_0 - \ell = \frac{P_0^2 l^3}{24T_0^3}. \quad (5)$$

С учетом (5) выражение (3) преобразуется к виду

$$E_d = \frac{P_0^2 l^3}{24T_0^3} \left(1 - \frac{EFP_0^2 l^2}{48T_0^3} \right). \quad (6)$$

Критическое напряжение провода определяется из выражения (6), если принять условие нерастяжимости, то есть $E_d = 0$. На основе данного допущения имеем

$$\left(1 - \frac{EFP_0^2 l^2}{48T_0^3} \right) = 0. \quad (7)$$



T_ℓ – натяжение, соответствующее горизонтальному положению провода, T_0 – натяжение провода в статическом равновесии, L_0 – длина провода в статическом равновесии

Рисунок 4 – Схема для определения энергии деформации

На практике удобно использовать вместо натяжения T_0 механическое напряжение σ_0 . Соотношение между натяжением и напряжением определяется известной формулой

$$T_0 = F\sigma_0. \quad (8)$$

В формуле (7), выражая натяжение через напряжение и решив относительно искомого напряжения, получим расчетную формулу

$$\sigma_{кр} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{EFP_0^2 l^2}{\sigma F^2}}. \quad (9)$$

Следовательно, дополнительный узел колебания в пролете не образуется ($z = 0$), если начальное напряжение провода превышает или равно критическому напряжению ($\sigma_0 \geq \sigma_{кр}$). Если напряжение провода меньше критического напряжения ($\sigma_0 < \sigma_{кр}$), то при колебаниях провода на анкерном пролете наблюдаются краевые эффекты ($z \neq 0$).

Выполненные расчеты по формуле (9) дают следующие результаты: для $\ell = 120$ м критиче-

ское напряжение $\sigma_{кр} = 3,0$ ДаН/мм²; для $\ell = 288$ м критическое напряжение $\sigma_{кр} = 5,3$ ДаН/мм²; для $\ell = 354$ м критическое напряжение $\sigma_{кр} = 6,1$ ДаН/мм².

Эти результаты довольно хорошо согласуются с экспериментальными данными (рисунок 3).

Выводы

Проведенные исследования показали, что при малых начальных напряжениях колебания провода с полуволной в пролете на анкерном участке в «чистом» виде получить не удастся. Величина критического напряжения, при котором нарушается форма колебания зависят от длины пролета и характеристики провода. Однако при повышен-

ных начальных напряжениях (8 ДаН/мм² и более), которые характерны для действующих линий, колебания проводов с полуволной в пролете, можно сказать, наблюдается без краевых эффектов.

Таким образом, предположение, что конфигурация провода при полуволновых колебаниях подчиняется синусоидальным законам

$$y(x) = \sin \frac{\pi x}{l},$$

оправданы, и эти координатные функции могут быть с успехом использованы для решения достаточно разнообразных задач, возникающих при исследовании пляски проводов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бекметьев Р.М., Жакаев А.Ш., Ширинских Н.В. Пляска проводов воздушных линий электропередачи. – Алма-Ата: Наука КазССР, 1979. С. 152.
2. Джаманбаев М.А., Малдыбаева Т.С., Абитаева Р.Ш. Условия возникновения пляски проводов и характер повреждения ЛЭП. – ISBN 978-601-228-807-0 // Труды международных Сатпаевских чтений. – Том I. Алматы: КазНТУ им. К.И. Сатпаева, 2016. С. 49-51.
3. Ловецкая Е.Н., Савваитов Д.С., Шапцов В.А. Анализ случаев пляски проводов ВЛ 10-750 кВ // Электрические станции. 1987. № 2.
4. Хамидуллин И.Н., Ильин В.К., Сабитов Л.С., Стрелков Ю.М. К вопросу о надежности воздушных линий электропередачи // Электротехнические и информационные комплексы и системы. № 1. Т. 1. 2017. С. 5-10.
5. Джаманбаев М.А., Токенов Н.П. Математическое моделирование для оценки динамических нагрузок на провода при пляске воздушных линий // Сборник материалов XII Международной научно-технической конференции «Электромеханика и энергетические системы, методы моделирования и оптимизаций». – Кременчук (Украина): КрНУ им. Остроградского. – 10-11 апреля 2014 г. С. 112-113.
6. Крюков К.П., Новгородцев Б.П. Конструкции и механический расчет линий электропередачи. 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергия, Ленинградское отделение, 1979. 312 с.

Электр желісіндегі сымдардың жартылай толқынды билеулері кезіндегі сым конфигурациясын сипаттауда серпімді жіп теориясын қолдану шегі

¹**ДЖАМАНБАЕВ Мураткали Абенович**, ф.-м.ғ.к., қауымдастырылған профессор, dzhamanbaev@mail.ru,

^{1*}**ЖҰМАХАН Нұржан Бейбітұлы**, магистр, ассистент, Nurzhan_14_95@mail.ru,

¹**ИЛЬЯСОВ Ержан Сейтович**, магистр, ассистент, ilyassov.yerzhan@mail.ru,

¹Алматы технологиялық университеті, Қазақстан, Алматы, Төле би көшесі, 100,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Тоғы бар сымдардағы резонанстық құбылыстарды зерттегенде кейбір авторлар жартылай толқынды би кезінде сымның конфигурациясы (пішіні) синусоидқа сәйкес келеді және координаталық функция ретінде синусоидалы заң қолданылады деп есептейді. Синусоидалы заңмен жарты толқындар ішіндегі барлық сым қималары бірдей қозғалыс бағытына ие, бір уақытта бейтарап позициядан өтіп, шеткі жоғарғы және төменгі позицияларға жетеді. Дегенмен, электр желісінің якорь аралығындағы сымның тербелмелі процесін бақылау төмен механикалық кернеулер кезінде сым дірілінің сипаты жоғарыда көрсетілгеннен айтарлықтай ерекшеленетінін көрсетті. Айырмашылық аралықта қосымша діріл түйіндерінің пайда болуымен байланысты. Түйіндер арасындағы сымның қозғалысы үш жарты толқындық тербелістерге ұқсайтын антифазада (шеттік эффектілерде) болады, тек жарты толқын ұзындығы әртүрлі. Қозғалатын түйіндердің координаталары бақылаулар мен есептеулер көрсеткендей, сымның бастапқы механикалық кернеуіне, аралықтың ұзындығына және сымның брендіне байланысты. Осыған байланысты жартылай толқынды би процесінде сымдардың конфигурациясын сипаттау үшін синусоидалы заңның қолдану мүмкіндігін анықтау және соның нәтижесінде «би» құбылыстарын зерттеу үшін жіп тербелісі теориясын қолдану мәселесі туындайды. Жартылай толқынды тербелістерге арналған сым конфигурацияларын анықтау бойынша тәжірибелік деректердің нәтижелері берілген. Шеттік әсерлер байқалатын сымның критикалық кернеуінің есептеу формуласы алынады. Тиісті қорытындылар мақаланың соңында берілген.

Кілт сөздер: электрмен қамтамасыздандыру сенімділігі, сымдардың зақымданулары, электр тасымалдау желісі, анкерлік пролет, сымдардың билеулері, сым конфигурациясы, шеттік эффектi, критикалық кернеу.

On the Limits of Applicability of the Theory of String Vibrations in Assessing the Configuration of Wires of a Power Transmission Line in the Process of One-half-wave «Dance»

¹**DJAMANBAYEV Muratkali**, Cand. of Phys. and Math. Sci., Associate Professor, dzhamanbaev@mail.ru,

¹***ZHUMAKHAN Nurzhan**, Master, Assistant, Nurzhan_14_95@mail.ru,

¹**ILYASSOV Yerzhan**, Master, Assistant, ilyassov.yerzhan@mail.ru,

¹Almaty Technological University, Kazakhstan, Almaty, Tole Bi Street, 100,

*corresponding author.

Abstract. When studying the «dance», some authors assume that the configuration (shape) of the wire during a one-half-wave dance corresponds to a sinusoid and the sinusoidal law is used as a coordinate function. With such fluctuations, all sections of the wire within the half-waves have the same direction of movement, simultaneously pass the neutral position and reach the extreme upper and lower positions. However, observations of the oscillatory processes of wires on the anchor spans of a power transmission line showed that at low mechanical stresses of the wire, the nature of the oscillation with one half-wave differs significantly from the above. The difference lies in the fact that additional vibration nodes appear within the span. Between the nodes, the wires move in antiphase, resembling three-half-wave oscillations, only with different half-wave lengths (edge effects). The coordinates of the moving nodes, as observations show, depend on the initial mechanical stress of the wire. In this regard, the question arises about the limits of applicability of the theory of string vibrations in describing the configuration of wires in the process of a one-half-wave dance. The results of experimental data on the identification of wire configurations for single-half-wave oscillations are presented. The calculation formula for the critical voltage of the wire, at which edge effects are observed, is obtained. The relevant conclusions are presented at the end.

Keywords: reliability of power supply, damage to wires, power line, anchor span, wire dance, wire configuration, edge effects, critical stress.

REFERENCES

1. Bekmet'ev R.M., Zhakaev A.Sh., Shirinskih N.V. Pljaska provodov vozdushnyh linij jelectroperedachi. – Alma-Ata: Nauka KazSSR, 1979. P. 152.
2. Dzhamanbaev M.A., Malybaeva T.S., Abitaeva R.Sh. Uslovia vozniKnovenija pljaski provodov i harakter povrezhdenija LJeP. – ISBN 978-601-228-807-0 // Trudy mezhdunarodnyh Satpaevskih chtenij. – Tom I. Almaty: KazNTU im. K.I. Satpaeva, 2016. Pp. 49-51.
3. Loveckaja E.N., Savvaitov D.S., Shkapcov V.A. Analiz sluchaev pljaski provodov VL 10-750 kV // Jelektricheskie stancii. 1987. No. 2.
4. Khamidullin I.N., Ilyin V.K., Sabitov L.S., Strelkov Yu.M. On the reliability of overhead power lines // Electrotechnical and information systems and systems. No. 1. T. 1. 2017. Pp. 5-10.
5. Dzhamanbaev M.A., Tokenov N.P. Mathematical modeling for the assessment of dynamic loads on wires during aerial line dance // Collection of materials of the XII International Scientific and Technical Conference «Electromechanics and Energy Systems, Modeling and Optimization Methods». – KremenChuk (Ukraine): KrNU named after Ostrogradsky-April 10-11, 2014. Pp. 112-113.
6. Krjukov K.P., Novgorodcev B.P. Konstrukcii i mehanicheskij raschet linij jelectroperedachi. 2-e izd., pererab. i dop. – Leningrad: Jenergija, Leningradskoe otdelenie, 1979. 312 p.