


ЭНЕРГЕТИКА
ENERGY
ЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.315.1:534.1

DOI 10.52167/1609-1817-2024-131-2-467-476

М.А. Джаманбаев, Ж.Е. Каратаева, З.А. Джумабекова, Н.Б. Жумахан , Е.С. Ильясов
Алматинский технологический университет, Алматы, Казахстан
E-mail: nurzhan_14_95@mail.ru

ОЦЕНКА СТРЕЛЫ ПРОВЕСА ПРОВОДА В ПРОЛЕТЕ ПО ЧАСТОТЕ ЕГО
СОБСТВЕННЫХ ПОПЕРЕЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Аннотация. В статье поднимается вопрос мониторинга состояния воздушных линий по стреле провеса провода в пролете. При этом, оценка стрелы провеса производится по собственной частоте свободного поперечного колебания провода. Для описания зависимости, между стрелой провеса и частотной характеристикой провода, рассматривается уравнение колебания струны, в результате чего получена расчетная формула, связывающая стрелы провеса с частотой. Правомерность такой постановки задачи и достоверность результатов обоснованы экспериментально.

Расчетная формула для определения стрелы провеса по частоте свободного колебания провода, позволяет реализовать периодический контроль действующих линий по параметру стрелы провеса. Реализация данного способа не требует специальных средств измерения, что упрощает задачу мониторинга.

Ключевые слова. Линия электропередачи, мониторинг, стрела провеса, уравнение струны, линейная частота, эксперимент.

Введение.

При обследовании линий электропередачи, возникает необходимость периодического контроля параметра воздушной линии - стрелы провеса. Стрела провеса провода f_0 , представляет собой вертикальное расстояние от самой нижней точки провода в пролете до прямой, соединяющей точки крепления провода на опорах (рисунок 1).

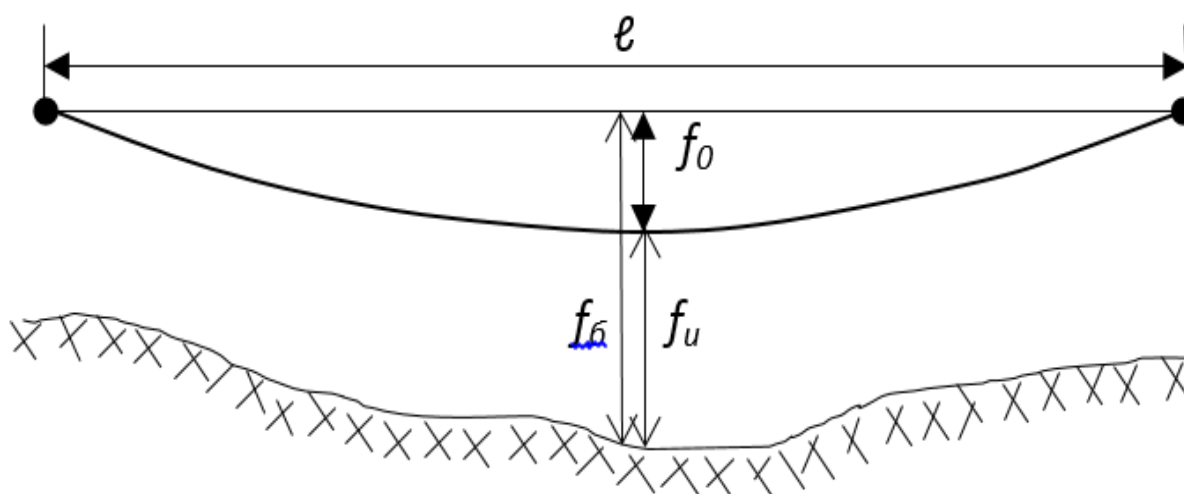


Рисунок 1 - Измерение стрелы провеса провода на опытном участке с помощью рулетки

Если длина пролёта воздушной линии электропередачи составляет менее 800 м, расчет стрелы провисания провода производят по формуле [1].

$$f_0 = \frac{P_0 \ell^2}{8T_0} = \frac{P_0 \ell^2}{8\sigma_0 F}, \quad (1)$$

где P_0 – вес единицы длины провода, T_0 – натяжение провода, σ_0 – механическое напряжение провода, ℓ - длина пролета, F - площадь поперечного сечения провода.

Стрела провеса (связанное с ней натяжение провода), является наиболее важным параметром, используемым при расчетах механических нагрузок на провод воздушной линии. Кроме того, по стреле провеса определяется высота расположения приведенного центра тяжести проводов (или тросов) h_{np} для габаритного пролета [2], определяемая по формуле:

$$h_{np} = h_{cp} - \frac{2}{3} f_0, \quad (2)$$

где h_{cp} (м)- среднеарифметическое значение высоты крепления провода к изоляторам или среднеарифметическое значение высоты крепления тросов к опоре, отсчитываемое от отметок земли в местах установки опор, f_0 (м)- расчетная стрела провеса провода или троса в середине пролета при высокой температуре или гололеде без ветра.

Материалы и методы.

Традиционно стрелу провеса каждого линейного провода оценивают на стадии строительства и технического обслуживания в соответствии с правилами устройства электроустановок (ПУЭ) [3]. Однако, под воздействием различных факторов (ветровые и гололедные нагрузки, температурные воздействия и т.д.), провода со временем могут приобрести дополнительные удлинения (деформация). В результате фактическая стрела провеса провода может отличаться от расчетной, что приводит к нарушению нормативного значения h_{np} . Следовательно, одной из основных функций технической службы по обеспечению надежности линий электропередачи, является выезд рабочей бригады для периодического осмотра или наблюдения за состоянием воздушных линий на проблемных участках, в том числе периодический контроль стрелы провеса проводов в пролетах [4-7].

Для определения (измерения) стрелы провеса провода воздушных линий, в настоящее время применяются такие методы как: измерение вручную с помощью рулетки, изолирующих штанг, капронового или сухого хлопчатобумажного каната, визирующих реек; с использованием угломерных приборов (теодолитов, нивелиров, карманных высотометров); фотограмметрии (лазерное сканирование, оптический метод измерения, инклинометрический метод). Данным методам присущи различные недостатки и ограничения [5].

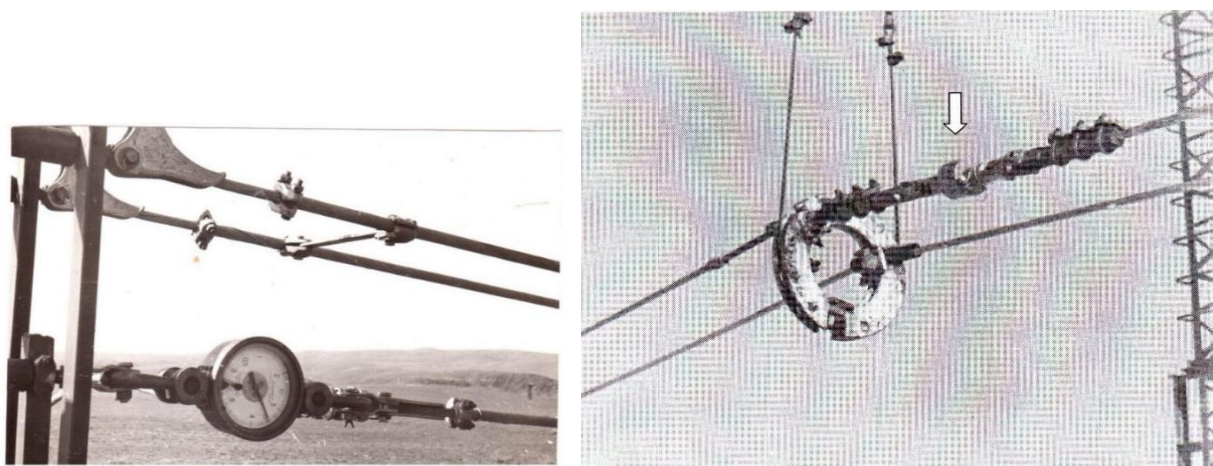
К примеру, для проведения натурных наблюдений за колебаниями проводов (субколебания и пляска проводов), для проверки эффективности различных типов гасителей от этих колебаний, а так же для изучения характеристик одиночных проводов и расщепленных фаз, были сооружены на испытательном полигоне Казахского научно-исследовательского института Энергетики (КазНИИЭ) им. академика Ш.Ч. Чокина

полномасштабные экспериментальные участки воздушных линий (ныне не функционирующие). При более ранних эксплуатациях (во время проведения экспериментов) стрела провеса определялась косвенно, согласно формуле (рисунок 1):

$$f_0 = f_b - f_u, \quad (3)$$

где f_b – базовое расстояние (известная величина, устанавливается заранее), f_u – измеряемая величина.

По мере оснащения опытного полигона измерительными средствами, натяжение провода определялось механическим динамометром и электродинамометром (рисунок 2). При этом стрела провеса провода вычислялась по формуле (1).



а - механический динамометр, б - электродинамометр ЭИН-20 (смотреть по направлению стрелки)

Рисунок 2 - Контроль натяжения провода с помощью стандартных механических средств измерения

В настоящее время разработка альтернативного метода определения стрелы провеса провода (натяжения провода), позволяющего реализовать постоянный контроль этих параметров на действующих линиях без применения специальных средств измерения является актуальной задачей.

Результаты и обсуждение.

Ниже производится оценка стрелы провеса провода в пролете по частоте его собственных поперечных колебаний. В статье [6] приведена расчетная формула, позволяющая по периоду маятникового колебания провода в пролете определить стрелу его провеса. При выводе расчетной формулы провод в пролете рассматривается как физический маятник, где в качестве тела выступает провод, а в роли неподвижной оси вращения – прямая, проходящая через точки подвеса провода.

Расчетная формула (4), заимствованная из источника [6] несколько преобразована и вместо периода используется линейная частота маятникового колебания:

$$f_0 = \frac{5g}{16\pi^2 v^2}, \quad (4)$$

где v - линейная частота маятникового колебания (Гц).

В заключении статьи отмечается, что разработанная модель нуждается в экспериментальном подтверждении и на данный момент доказывается лишь теоретическая возможность определения стрелы провеса провода по периоду его колебаний. Кроме того, при выводе расчетной формулы не оценивается влияние дополнительного натяжения провода на величину частоты, возникающего в процессе колебания.

В отличие от работы [6], в настоящей статье оценка стрелы провеса провода производится по собственной частоте свободного поперечного колебания струны. Правомерность такой постановки задачи обоснована экспериментально.

При поперечных колебаниях струна деформируется, что приводит к изменению ее начального натяжения. Уравнение колебания струны с учетом дополнительного натяжения имеет вид [8]

$$m_0 \frac{\partial^2 y(z, t)}{\partial t^2} = (T_0 + \Delta T) \frac{\partial^2 y(z, t)}{\partial z^2}, \quad (5)$$

где m_0 - масса единицы длины струны, z - текущая координата, t - время, ΔT - дополнительное натяжение, которое определяется согласно закону Гука

$$\Delta T = \frac{EF}{\ell} \Delta \ell = \frac{nEE}{2\ell} \int_0^{\ell/n} \left[\frac{\partial y(z, t)}{\partial z} \right]^2 dz, \quad n=1,2,3,\dots \quad (6)$$

где $\Delta \ell$ - удлинение струны, E - модуль упругости.

В выражениях (5) и (6) координатную функцию $y(z, t)$ представим следующим образом

$$y(z, t) = \sin \frac{n\pi z}{\ell} q(t), \quad (7)$$

где $q(t)$ - функция, зависящая от времени.

Результат интегрирования (6) (с учетом выражения (7))

$$\Delta T = \frac{\pi^2 n^2 EF}{4\ell^2} q^2(t). \quad (8)$$

После преобразования уравнения колебания струны (5) с учетом выражения (7) и (8), получается нелинейное уравнение относительно обобщенной координаты $q(t)$

$$m_0 \frac{d^2 q(t)}{dt^2} + \left(\frac{n\pi}{\ell} \right)^2 \frac{T_0}{m_0} q(t) + \left(\frac{n\pi}{\ell} \right)^4 \frac{EF}{4m_0} q^3(t) = 0. \quad (9)$$

Решение уравнения (9) ищем методом Бубнова - Галеркина, приняв

$$q(t) = A \cos \omega_0 t, \quad (10)$$

где A - амплитуда колебания, ω_0 - круговая частота (рад/с), связанная с линейной частотой ν_0 (Гц) соотношением:

$$\omega_0 = 2\pi\nu_0. \quad (11)$$

По методу Бубнова – Галеркина необходимо, чтобы выполнялось условие

$$\int_0^{2\pi/\omega_0} \left[-A\omega_0^2 \cos \omega_0 t + \left(\frac{n\pi}{\ell}\right)^2 \frac{T_0}{m_0} A \cos \omega_0 t + \left(\frac{n\pi}{\ell}\right)^4 \frac{EF}{4m_0} A^3 \cos^3 \omega_0 t \right] \cos \omega_0 t dt = 0. \quad (12)$$

Из интегрального уравнения (12) получим собственную частоту свободного поперечного колебания струны с поправкой на нелинейный член уравнения:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{T_0}{m_0} \left(\frac{n\pi}{\ell}\right)^2 + \frac{3}{16} \left(\frac{n\pi}{\ell}\right)^4 \frac{EF}{m_0} A^2}, \quad n=1,2,3,\dots \quad (13)$$

Как показывает анализ формулы (13), применительно для высоковольтных линий электропередачи выполняется условие:

$$\frac{T_0}{m_0} \left(\frac{n\pi}{\ell}\right)^2 \gg \frac{3}{16} \left(\frac{n\pi}{\ell}\right)^4 \frac{EF}{m_0} A^2. \quad (14)$$

В этом случае формулу (13) можно несколько упростить:

$$\omega_0 = \frac{n\pi}{\ell} \sqrt{\frac{T_0}{m_0}} = \frac{n\pi}{\ell} \sqrt{\frac{g\sigma_0 F}{P_0}}, \quad n=1,2,3,\dots \quad (15)$$

При преобразовании (15) учтены известные зависимости

$$m_0 = P_0/g \quad \text{и} \quad T_0 = \sigma_0 F.$$

На рисунках 3–5 приведены результаты сопоставления экспериментальных и теоретических данных. Теоретические частоты вычислены по формуле (15) (результаты представлены в Гц). Эксперименты по определению частоты поперечных колебаний проводов проводились на анкерном пролете при различных механических напряжениях провода σ_0 , различных числах полувольт ($n=2,3,4,5$) и длин пролетов. Экспериментальная оценка линейных частот осуществлялась следующим образом: фиксировалось секундомером время, необходимое для совершения проводом десять циклов колебаний. Далее частоты определялись путем деления числа колебаний на фиксированное время. Опыты повторялись несколько раз и результаты усреднялись. Кроме того, в процессе проведения опытов измерялись частоты колебаний при различных значениях амплитуды. Анализ полученных данных показывает, что интенсивность колебаний не оказывает заметного влияния на частоту.

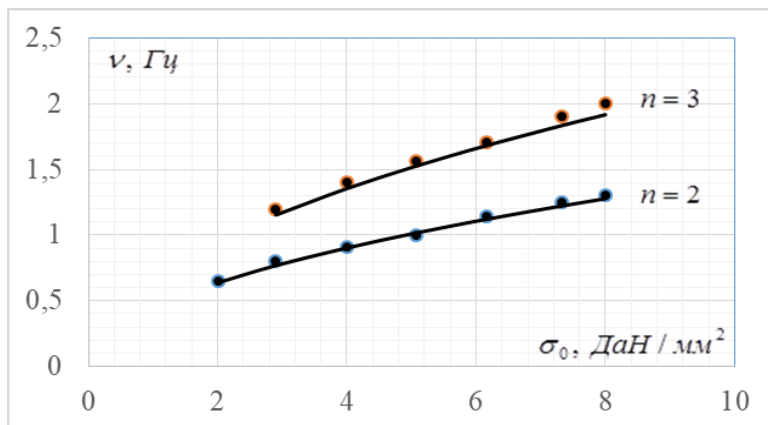


Рисунок 3 - Зависимости экспериментальных (точки) и теоретических (сплошные линии) частот от механического напряжения провода АС – 240/32. $\ell = 120$ м, $E = 7880$ ДаН/мм², $F = 275,7$ мм², $P_0 = 0,921$ ДаН/м

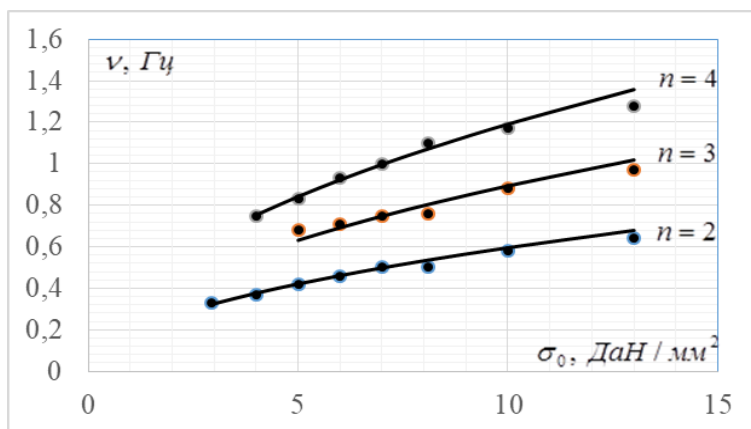


Рисунок 4 - Зависимости экспериментальных (точки) и теоретических (сплошные линии) частот от механического напряжения провода АС – 300/39. $\ell = 288$ м, $E = 7700$ ДаН/мм², $F = 339,6$ мм², $P_0 = 1,132$ ДаН/м

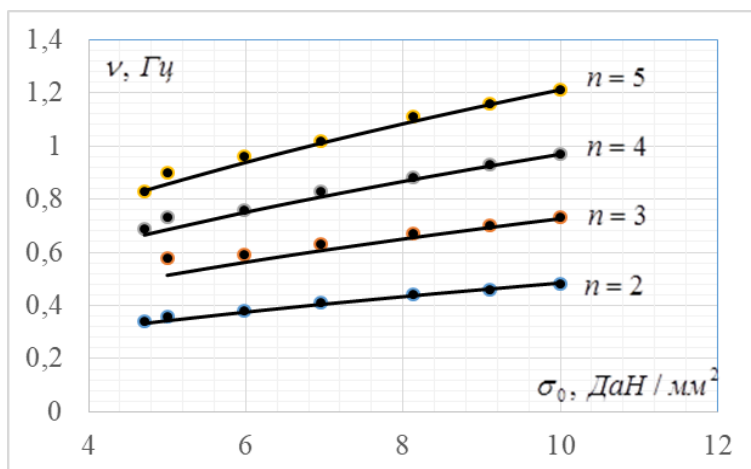


Рисунок 5 - Зависимости экспериментальных (точки) и теоретических (сплошные линии) частот от механического напряжения провода АС – 300/39. $\ell = 354$ м, $E = 7700$ ДаН/мм², $F = 339,6$ мм², $P_0 = 1,132$ ДаН/м

На основании данных рисунков можно отметить, что теоретические и эмпирические частоты поперечных колебаний провода оказываются достаточно близкими между собой при числе полуволн в пролете $n \geq 2$. Однако, как отмечается в источнике [10], при однополуволновых колебаниях ($n = 1$) фактические частоты оказываются более высокими по сравнению с расчетными.

Расчетную формулу, устанавливающую взаимосвязь между стрелой провеса и частотой, можно получить исключая из формулы (15) натяжение T_0 (определяется по формуле (1))

$$f_0 = \frac{g}{8v_0^2}. \quad (16)$$

Следует отметить, что в расчетной формуле (16) частота соответствует двухполуволновым колебаниям ($n = 2$), поскольку организация в ручном режиме двухполуволновых колебаний и измерения ее частоты намного проще чем многополуволновых ($n \geq 3$). Также следует отметить, что данная формула справедлива и при определении стрелы провеса в многопролетной системе.

Многопролетная система представляет собой участок линий, в котором провода в пролетах соединены между собой через гирлянды изоляторов. Особенность многопролетной системы заключается в том, что при колебаниях провода в данном пролете колебательный процесс передается в смежные пролеты через движение гирлянды изоляторов. Как показывают проведенные эксперименты (здесь не приводятся), частотная формула (15) справедлива и при такой форме организации колебательного процесса, следовательно предлагаемая расчетная формула (16) справедлива и для многопролетной системы.

На рисунке 6 приведена зависимость стрелы провеса и линейной частоты двухполуволнового колебания.

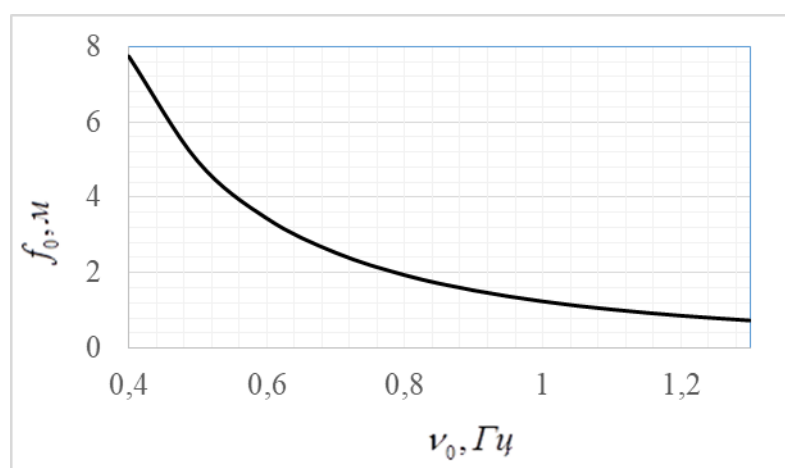


Рисунок 6 - Зависимость стрелы провеса от линейной частоты двухполуволнового свободного колебания провода

Заключение.

Предлагаемая в статье расчетная формула, для оценки стрелы провеса по линейной частоте двухполуволнового свободного колебания проводов, может быть с успехом использована при мониторинге состояния воздушных линий электропередачи. Получаемые при этом результаты тем точнее, чем точнее измеряется линейная частота.

Результаты исследования упрощают мониторинг состояния воздушных линий в методическом плане и во времени, что способствует повышению качества обслуживания линий электропередачи.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Крюков К.П., Новгородцев Б.П. Конструкции и механический расчет линий электропередачи.- Ленинград: Изд. Энергия, 1979.- 312 стр.

[2] Климатические условия и нагрузки - Элек.ру <https://www.elec.ru> › direction › pue › razdel-2-5-6

[3] Воздушные линии электропередачи напряжением выше 1 кВ. - М., ОАО «ВНИИЭ».ПУЭ. изд. 7-е. Глава 2.5 . 2003.

[4] Горячев Михаил Петрович. Система автоматизированного мониторинга силы тяжения провода воздушных линий электропередачи по параметрам кручения и провеса.- 05.11.13 «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий». Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук, Казань 2019

[5] Нгуен Ван Ву. Метод определения стрелы провеса провода по периоду его собственных колебаний и усовершенствованная система автоматизированного мониторинга состояния ВЛЭП.- 05.11.13 «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий». Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук, Казань 2021

[6] Ярославский Д.А., Нгуен В.В., Садыков М.Ф., Горячев М.П., Наумов А.А. Модель собственных гармонических колебаний провода для задач мониторинга состояния воздушных линий электропередачи // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 3 С. 97-106. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-3-97-106.

[7] Горячев М.П., Садыков М.Ф., Ярославский Д.А. Способ контроля механических параметров воздушных линий электропередачи на основе улучшенной инклинометрии // Энергетика: исследования, оборудование, технологии. 2019. Т.21 (3). С. 160-171.

[8] Светлицкий В.В., Стасенко И.В. Сборник задач по теории колебаний. Учебное пособие для вузов. – М.: «Высш. школа», 1973. - 456 стр.

[9] Джаманбаев М.А., Ильясов Қ. Экспериментальные и теоретические частоты свободных поперечных колебаний проводов ЛЭП.- Вестник КазННТУ им. К.И.Сатпаева.- № 2 (114) 2016. Стр. 72-78

[10] Бекметьев Р.М., Жакаев А.Ш., Ширинских Н.В. Пляска проводов воздушных линий электропередачи.- Алма-Ата, «Наука» КазССР, 1979. - 152 с.

REFERENCES*

[1] Krjukov K.P., Novgorodcev B.P. Konstrukcii i mehanicheskij raschet linij jelektroperedachi.- Leningrad: Izd. Jenergija, 1979.- 312 str.

[2] Klimaticheskie uslovija i nagruzki - Jelek.ru <https://www.elec.ru> › direction › pue › razdel-2-5-6

[3] Vozdushnye linii jelektroperedachi naprjazheniem vyshe 1 kV. - M., ОАО «VNIIE».PUJe. izd. 7-e. Glava 2.5 . 2003.

[4] Gorjachev Mihail Petrovich. Sistema avtomatizirovannogo monitoringa sily tjazhenija provoda vozdushnyh linij jelektroperedachi po parametram kruchenija i provesa.-

05.11.13 «Pribery i metody kontrolja prirodnoj sredy, veshhestv, materialov i izdelij». Avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tehniceskikh nauk, Kazan' 2019

[5] Nguen Van Vu. Metod opredelenija strely provesa provoda po periodu ego sobstvennyh kolebanij i usovershenstvovannaja sistema avtomatizirovannogo monitoringa sostojanija VLJeP.- 05.11.13 «Pribery i metody kontrolja prirodnoj sredy, veshhestv, materialov i izdelij». Avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tehniceskikh nauk, Kazan' 2021

[6] Jaroslavskij D.A., Nguen V.V., Sadykov M.F., Gorjachev M.P.,

Naumov A.A. Model' sobstvennyh garmonicheskikh kolebanij provoda dlja zadach monitoringa sostojanija vozdušnyh linij jelektroperedachi // Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. PROBLEMY JeNERGETIKI. 2020. T. 22. № 3 S. 97-106. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-3-97-106.

[7] Gorjachev M.P., Sadykov M.F., Jaroslavskij D.A. Sposob kontrolja mehanicheskikh parametrov vozdušnyh linij jelektroperedachi na osnove uluchshennoj inklinometrii // Jenergetika: issledovanie, oborudovanie, tehnologii. 2019. T.21 (3). S. 160-171.

[8] Svetlickij V.V., Stasenko I.V. Sbornik zadach po teorii kolebanij. Uchebnoe posobie dlja vuzov. – M.: «Vyssh. shkola», 1973. - 456 str.

[9] Dzhamanbaev M.A., Il'jasov K. Jeksperimental'nye i teoreticheskie chastoty svobodnyh poperechnykh kolebanij provodov LJeP.- Vestnik KazNITU im. K.I.Satpaeva.-№ 2 (114) 2016. Str. 72-78

[10] Bekmet'ev R.M., Zhakaev A.Sh., Shirinskih N.V. Pljaska provodov vozdušnyh linij jelektroperedachi.- Alma-Ata, «Nauka» KazSSR, 1979. - 152 s.

Мураткали Джаманбаев, ф-м.ғ.к., қауымдастырылған профессор, Алматы технологиялық университеті, Алматы, Қазақстан, dzhamanbaev@mail.ru

Жанбуби Каратаева, лектор, Алматы технологиялық университеті, Алматы, Қазақстан, zhanna_karataeva68@mail.ru

Зульфия Джумабекова, лектор, Алматы технологиялық университеті, Алматы, Қазақстан, zulfia2409@mail.ru

Нұржан Жұмахан, лектор, Алматы технологиялық университеті, Алматы, Қазақстан, Nurzhan_14_95@mail.ru

Ержан Ильясов, лектор, Алматы технологиялық университеті, Алматы, Қазақстан, ilyassov.yerzhan@mail.ru

СЫМНЫҢ САЛБЫРАУ СТРЕЛАСЫН ОНЫҢ ЕРКІН ТЕРБЕЛІСІНІҢ ЖИІЛІГІ АРҚЫЛЫ БАҒАЛАУ

Андатпа. Мақалада әуе желілерінің күйін сымның салбырау стреласы бойынша бақылау (мониторинг) мәселелері көтерілген. Сымның салбырау стреласын анықтау сымның еркін тербелісінің жиілігі арқылы жүзеге асады. Салбырау стреласы мен жиілік арасындағы байланысты сипаттау үшін ішектің (струна) теңдеуі қарастырылып, нәтижесінде салбырау стреласын жиілік арқылы бағалау формуласы ұсынылады. Мәселенің осы тұрғыда қойылу заңдылығы және ақиқаттығы тәжірибе жүзінде дәлелденген.

Сымның еркін тербеліс жиілігі бойынша салбырау стреласын анықтауға арналған есептеу формуласы әуе желілерінің күйін бақылауды жүзеге асыруға мүмкіндік береді. Ұсынылып отырған тәсілдің артықшылығы – мониторинг кезінде арнайы өлшеу құралдарын қажет етпейді және бақылау процедурасын жеңілдетеді.

Түйінді сөздер. Әуе желісі, мониторинг, салбырау стреласы, ішек (струна) теңдеуі, жиілік, эксперимент.

Muratkali Dzhamanbayev, candidate of physical and mathematical sciences, associate professor, Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan, dzhamanbaev@mail.ru

Zhanbubi Karataeva, lecturer, Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan, zhanna_karataeva68@mail.ru

Zulfiya Dzhumabekova, lecturer, Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan, zulfia2409@mail.ru

Nurzhan Zhumakhan, lecturer, Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan, Nurzhan_14_95@mail.ru

Yerzhan Ilyassov, lecturer, Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan, ilyassov.yerzhan@mail.ru

ESTIMATION OF THE SAG OF THE WIRE IN THE SPAN BY THE FREQUENCY OF ITS OWN TRANSVERSE OSCILLATIONS

Abstract. The article raises the issue of monitoring the condition of overhead lines by the parameter - the sag of the wire in the span. The sag is estimated by the natural frequency of the free transverse oscillation of the wire. To describe the relationship between the sag and the frequency response of the wire, the equation of string vibration is considered, as a result of which a calculation formula is obtained that relates the sag to the frequency. The legitimacy of such a statement of the problem and the reliability of the results are substantiated experimentally.

The calculation formula for determining the sag by the frequency of free oscillation of the wire allows you to implement constant monitoring of existing lines, according to the parameter - the sag. The implementation of this method does not require special measuring instruments, which simplifies the task of monitoring.

Keywords. Power line, span length, single wire, torque, twist angle, stiffness, diameter, model, experiment.
