

МРНТИ 45.47.29

М.А. Джаманбаев¹ – основной автор, | ©
Н.Б. Жумахан², Е.С. Ильясов³¹Канд. физ.-мат. наук, ^{2,3}Магистры

ORCID

¹<https://orcid.org/0000-0002-7208-0535>^{1,2,3}Алматинский технологический университет

г. Алматы, Казахстан

¹nurzhan_14_95@mail.ru<https://doi.org/10.55956/QPSL9304>

ФИЗИЧЕСКАЯ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛИ ПЛЯСКИ ПРОВОДОВ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Аннотация. В статье приводится краткий обзор по ранее проведенным исследовательским работам по изучению пляски проводов. Описана физическая модель пляски проводов с точки зрения автоколебательных процессов. Рассмотрена методика оценки возможной амплитуды пляски, основанная на анализе энергетического баланса процесса колебания. Приведена расчетная формула для определения амплитуды стационарной пляски проводов.

Ключевые слова: воздушная линия электропередачи, пляска проводов, автоколебания, физическая модель, энергетический баланс, амплитуда стационарной пляски.



Джаманбаев, М.А. Физическая и энергетическая модели пляски проводов линии электропередачи [Текст] / М.А. Джаманбаев, Н.Б. Жумахан, Е.С. Ильясов // Механика и технологии / Научный журнал. – 2022. – №4(78). – С.75-80. <https://doi.org/10.55956/QPSL9304>

Введение. Пляска проводов, как фактор снижения надежности электроснабжения, известна около века. Явление «пляски» представляет собой низкочастотные колебания, с большой амплитудой наблюдается на воздушных линиях при ветре и, как правило, при наличии на проводах гололедных отложений. В процессе пляски имеют место опасные сближения проводов, которые приводят к перекрытиям, в некоторых случаях могут иметь место пережоги проводов и повреждения других элементов линии электропередачи.

В 1934 г. Ден-Гартогом описана физическая сущность явления для простейшего случая – колебания отрезка провода с гололедом, подвешенного на пружинах и помещенного в ветровой поток [1]. Показано, что пляска проводов представляет собой автоколебательный процесс, который возбуждается и поддерживается аэродинамическими силами, возникающими при обтекании воздушным потоком проводов, покрытых гололедом. В результате проведенного исследования [2] также было показано, что пляска проводов представляет собой автоколебательный процесс.

В источниках [3,4] установлены критерии, позволяющие выявить зоны неустойчивости, т.е. условия при которых возможно возникновение автоколебаний. Достаточно подробный анализ основных сил и крутящих

моментов, действующих на отрезок провода при пляске позволил составить математическую модель явления [5].

Результаты изучения пляски проводов показывают, что для возбуждения колебаний требуются определенные условия. Главными из них являются сочетания определенной скорости, направления ветра и гололеда, имеющего неустойчивую аэродинамическую характеристику. Такие благоприятные сочетания в естественных условиях наблюдаются довольно редко, что является одной из главных трудностей при исследовании явления пляски непосредственно на действующих линиях электропередачи. В связи с этим для исследования пляски созданы опытные участки воздушных линий. Пляска на этих линиях возбуждается путем прикрепления к проводам специальных обтекателей, имеющих неустойчивую аэродинамическую характеристику [6,7].

Результаты исследований и их обсуждение. Рассмотрим пляску проводов с точки зрения автоколебаний. С физической точки зрения автоколебательный процесс достаточно сложен. В автоколебательных системах движение системы сопровождается расходом энергии, однако расход энергии на сопротивления точно компенсируется поступлениями из некоторого неколебательного источника – поступлениями, дозировка которых по времени подачи и по величине регулируются самой колебательной системой. Вследствие этого в автоколебательной системе могут возникать устойчивые периодические незатухающие колебания – так называемые автоколебания.

Способ компенсации расхода энергии является наиболее характерным свойством автоколебательной системы. Таким же характерным свойством автоколебательной системы является наличие в ее конструктивной схеме следующих четырех частей (рис. 1) [8]:

- 1) постоянный (неколебательный) источник энергии;
- 2) колебательная система;
- 3) устройство, регулирующее поступления в колебательную систему энергии из источника энергии;
- 4) обратная связь между колебательной системой и регулирующим устройством, осуществляющая управления дозировкой подачи энергии в колебательную систему.

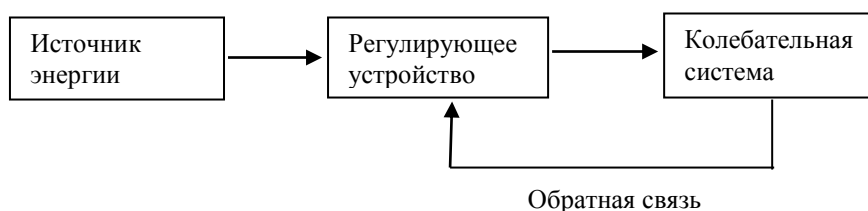


Рис. 1. Схема автоколебательной системы

В автоколебательной системе регулирующее устройство управляет движением колебательной системы, а колебательная система через обратную связь управляет работой регулирующего устройства. Т.е, в автоколебательной системе осуществляется самоуправление энергетическим балансом системы, в результате чего в ней могут возникнуть устойчивые незатухающие колебания. Колебательные процессы не зависят от начальных

условий и при любых начальных условиях система стремится к некоторому устойчивому периодическому движению (устойчивый предельный цикл).

При пляске провод совершает вертикальные, горизонтальные и крутильные колебания. При анализе внешних воздействий следует иметь в виду, что основную роль выполняют аэродинамические силы (зависящие в свою очередь от скорости ветра), которые служат источником энергии для поддержания колебательного процесса.

Данные наблюдений показывают, что крутильные движения представляют собой вынужденные колебания, следующие за поступательными. Такая синхронность объясняется аэродинамическим взаимодействием через обратную связь между линейным и крутильным колебаниями. Здесь угол атаки гололеда определяется главным образом - линейными перемещениями провода, в свою очередь, аэродинамический момент, вызывающий крутильные движения, зависит от угла атаки.

Механизм пляски проводов с точки зрения энергетики можно объяснить следующим образом [7]. При рассмотрении энергетического баланса следует различать два вида составляющих энергии: энергия ветрового потока E_a , направленная на поддержания пляски (активная энергия) и энергия E_p , расходуемая на преодоление аэродинамических сопротивлений и сил внутреннего трения в проводах. На рисунке 2 в качестве примера приведено изменение энергии колеблющегося провода (кривая 1) и энергии рассеяния (кривая 2) при увеличении амплитуды пляски.

Установившаяся амплитуда пляски A_0 будет соответствовать равенству энергии, получаемой проводом и расходуемой им на работу сил сопротивления колебаниям, т.е. при выполнении условия $E_a = E_p$. Процесс пляски в этих условиях будет стационарным.

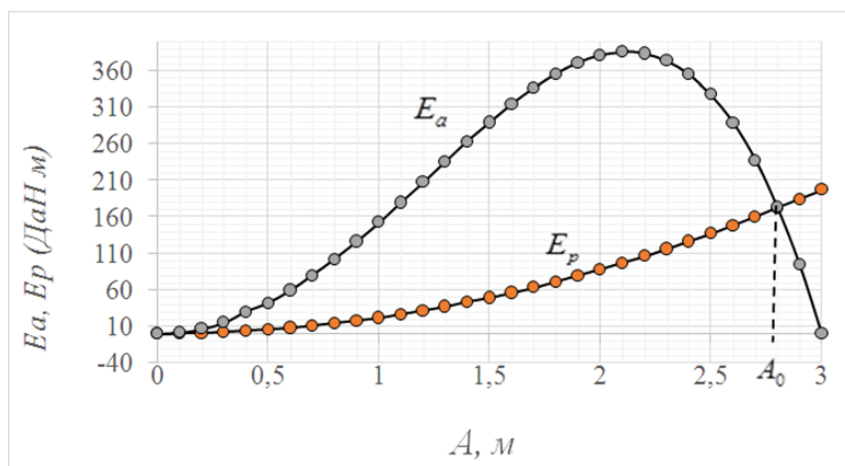


Рис. 2. Энергетический баланс колебательного процесса

Если амплитуда A_0 увеличивается, например с помощью дополнительной периодической внешней силы, приложенной к проводу синхронно с его линейными движениями, то энергетический баланс станет отрицательным ($E_a - E_p < 0$). При исчезновении внешних сил, увеличивавших амплитуду, интенсивность пляски будет снижаться до амплитуды A_0 , поскольку энергия потерь выше энергии, подводимой к проводу. Аналогичную картину можно наблюдать при снижении амплитуды

по каким-либо внешним причинам. Возникающий при этом избыток энергии в системе приведет к росту амплитуды до величины A_0 .

В работе [9] приводятся исследования автоколебательного процесса методом Ван-Дер-Поля, в результате которого получена расчетная формула для определения амплитуды стационарной однополуволновой пляски проводов расщепленной фазы при заданных скоростях ветра, известных параметрах линии электропередачи и аэродинамических характеристик обледенелых проводов.

$$A_0 = \sqrt{\frac{2V^2}{\omega_a^2} \left(\frac{C_{D0} + C_{L0}}{C_{L1}} \right) \left(1 - \frac{V_{kp}^H}{V} \right)} \quad (1)$$

здесь V_{kp}^H - нижняя критическая скорость при которой возбуждается пляска проводов, определяется по формуле [10]

$$V_{kp}^H = \frac{\delta \omega_a P_{ввр}}{2g \rho d_{\Pi} (C_{D0} + C_{L0})} \quad (2)$$

где: V - скорость ветра; C_{L0} , C_{L1} и C_{D0} – стационарные коэффициенты аэродинамических характеристик; ω_a – собственная частота свободных колебаний расщепленной фазы; δ – декремент затухания; $P_{ввр}$ – вес единицы длины провода с учетом гололеда; g – ускорения силы тяжести; ρ – плотность воздуха; d_{Π} – характерный размер профиля.

Заключение. Явления «пляски» изучаются давно (более 90 лет), однако до настоящего времени механизм пляски раскрыт не в полной мере и не существует универсального метода защиты от пляски проводов.

Анализ проведенный некоторыми авторами механизма пляски показывает, что пляска проводов относится к явлениям, известным под названием автоколебания. Как известно, в автоколебательной системе осуществляется самоуправление энергетическим балансом системы, в результате чего в ней могут возникнуть устойчивые незатухающие колебания. Так, в процессе пляски, линейные движения провода через обратную связь воздействуют на крутильные движения провода. Крутильные движения провода в свою очередь воздействует на линейные движения путем дозирования энергии, поступающей от ветрового потока и направленного на преодоления различного рода сопротивления.

Следует отметить, что упрощенный подход к проблеме пляски без учета достаточно сложного взаимодействия между ветровым потоком и движущимся проводом не позволяет получить достаточно обоснованных результатов и в лучшем случае может привести к общим качественным выводам.

Математическое выражение процесса пляски связано со значительными трудностями в связи с нелинейными характеристиками большинства сил и моментов, действующих на провод при пляске. Поэтому в ряде случаев, при определении параметров пляски используются различные инженерные методы расчета, например, анализ энергетического баланса колебательного процесса.

В связи с этим, для более полного решения проблемы пляски проводов, необходимо продолжить исследовательские работы в различных направлениях.

Список литературы

1. Ден-Гартог, Дж.П. Механические колебания (русский перевод). - М.: Физматгиз, 1960.
2. Власов, И.И. Механические расчеты вертикальных цепных контактных подвесок [Текст] / И.И. Власов // Трансжелдориздат, Труды ВНИИЖТ. – 1957. - №138.
3. Richardson, A.S. An Investigation of Galloping Transmission Line Conductors // Proc. IEEE. – 1963. No.12.
4. Parkinson G.V., Savtosham T.V. Cylinders of Rectangular Sectionas Aeroelastig Non-LinerOscillators // ASME Vibrations Conference. Boston, 1967.
5. Richardson A.S., Marttucelli J.R., Price W.S. Research study on galloping of electric power transmission lines // Wind Effects Build. And Struct. – 1965. – No.2.
6. Ratkowski James, J. Experiments with galloping spans // IEEE Trans. Power Apparatus and Systems. – 1963. No.68.
7. Бекметьев, Р.М. Пляска проводов воздушных линий электропередачи [Текст] / Р.М. Бекметьев, А.Ш. Жакаев, Н.В. Ширинских. – Алматы: Наука КазССР. – 1979. - 150 с.
8. Гуляев, В.И. Прикладные задачи теории нелинейных колебаний механических систем [Текст]: учеб. пособие для вузов / В.И. Гуляев, В.А. Баженов, С.Л. Попов. - М.: Высшая школа, 1989. - 383 с.
9. Djamanbayev M.A., Karataeva J.E., Dzhumabekova Z.A. Auto-oscillation sofwireshofhigh – voltagepowerlines (anchorspan) // Вестник Алматинского технологического университета. – 2020. - №2(127). – С.54-60.
10. Джаманбаев, М. А. Determination of the minimum wind speed leading to the galloping of conductors [Текст] / М. А. Джаманбаев, Б. Онгар, Д. Илиева, Р.Ш. Абитаева // 9th International Conference on Thermal Equipments, Renewable Energy and Rural Development (TE-RE-RD 2020). – 2020.

Материал поступил в редакцию 15.11.22.

М.А. Джаманбаев, Н.Б. Жумахан, Е.С. Ильясов

Алматы технологиялық университеті, Алматы қ., Қазақстан Республикасы

ЭЛЕКТР ЖОЛЫ СЫМДАРЫ ТЕРБЕЛІСІНІҢ ФИЗИКАЛЫҚ ЖӘНЕ ЭНЕРГИЯЛЫҚ МОДЕЛЬДЕРІ

Аңдатпа. Мақалада сым тербелісін зерттеу бойынша алдыңғы зерттеу жұмыстарының қысқаша шолуы берілген. Сымдар тербелісінің физикалық моделі өзіндік тербеліс процестері тұрғысынан сипатталған. Тербеліс процесінің энергетикалық балансын талдау негізінде тербелістің мүмкін амплитудасын бағалау әдістемесі қарастырылған. Сымдардың қозғалмайтын тербелісінің амплитудасын анықтауға арналған есептеу формуласы келтірілген.

Тірек сөздер: әуе электр желісі, сым тербелісі, өзіндік тербеліс, физикалық модель, энергия балансы, стационарлық тербеліс амплитудасы.

M.A. Jamanbayev, N.B. Zhumakhan, E.S. Ilyasov

Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan

**PHYSICAL AND ENERGY MODELS OF THE VIBRATION OF WIRES
OF A POWER TRANSMISSION LINE**

Abstract. The article provides a brief overview of previous research work on the study of the vibration of wires. The physical model of the vibration of wires is described from the point of view of self-oscillatory processes. A technique for estimating the possible amplitude of the vibration, based on the analysis of the energy balance of the oscillation process, is considered. The calculation formula for determining the amplitude of the stationary vibration of wires is given.

Keywords: overhead power line, wire vibration, self-oscillations, physical model, energy balance, stationary vibration amplitude.

References

1. Den-Hartog J.P. Mekhanicheskiye kolebaniya [Mechanical vibrations]. – Moscow: Fizmatgiz – 1960 [in Russian].
2. Vlasov I.I. Mekhanicheskiye raschety vertikal'nykh tsepnykh kontaknykh podvesok [Mechanical calculations of vertical chain contact hangers]. – Moscow: Transzheldorizdat, Proceedings of VNIIZhT. – 1957. No. 138. [in Russian].
3. Richardson A.S.et. al. An Investigation of Galloping Transmission Line Conductors.- Proc. IEEE. – 1963. No.12.
4. Parkinson G.V., Savtosham, T.V. Cylinders of Rectangular Sectionas Aeroelastig Non-LinerOscillators. - ASME Vibrations Conference. Boston. – 1967.
5. Richardson A.S., Marttucelli J.R., Price W.S. Research study on galloping of electric power transmission lines. – Wind Effects Build. And Struct. – 1965. No.2.
6. Ratkowski James J. Experiments with galloping spans – IEEE Trans. Power Apparatus and Systems. – 1963. No. 68.
7. Bekmetiev R.M., Zhakaev A.Sh., Shirinsky N.V. Plyaska provodov vozduzhnykh liniy elektroperedachi [Vibration of wires of overhead power lines] // "Science" KazSSR, Almaty. – 1979. P.150 [in Russian].
8. Gulyaev V.I., Bazhenov V.A., Popov S.L. Prikladnyye zadachi teorii nelineynykh kolebaniy mekhanicheskikh system [Applied Problems of the Theory of Nonlinear Oscillations of Mechanical Systems] // Proc. Allowance for technical colleges .- Moscow: Higher school, 1989. P. 383 [in Russian].
9. Djamanbayev M.A., Karataeva J.E., DzhumabekovaZ.A. Auto-oscillationsofwiresofhigh – voltagepowerlines (anchorspan).- Bulletin of the Almaty Technological University. –Almaty, Issue – 2020. No. 2. P.54-60.
10. Dzhamanbaev M.A., Ongar B., Ilieva D., Abitaeva R.Sh. Determination of the minimum wind speed leading to the galloping of conductors.- 9th International Conference on Thermal Equipments, Renewable Energy and Rural Development – 2020.