

УДК 621.315

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ОГРАНИЧЕНИЯ ПЛЯСКИ ПРОВОДОВ РАССТРОЙСТВОМ ЧАСТОТ ИХ КОЛЕБАНИЙ

Докт. техн. наук, проф. СЕРГЕЙ И. И., инж. КЛИМКОВИЧ П. И.,
канд. техн. наук ВИНОГРАДОВ А. А.

*Белорусский национальный технический университет,
ЗАО «Электросетьстройпроект», г. Москва*

Многочисленные наблюдения и экспериментальные исследования показывают, что при пляске наряду с выраженными вертикальными движениями проводов имеют место синхронизированные с ними крутильные колебания. Закручивание провода может привести к дополнительному увеличению подъемных аэродинамических сил в соответствии с аэродинамическими характеристиками и амплитуд пляски по сравнению с «чистым» вертикальным движением проводов по Ден-Гартогу [1]. Поэтому ограничение и гашение крутильных колебаний является одним из способов предотвращения пляски проводов воздушных ЛЭП.

В статье рассматриваются два способа воздействия на уменьшение закручивания провода во время пляски. Основной из них – расстройка крутильных колебаний. В США, Канаде, Европейском Союзе, Японии и России накоплен большой опыт по ограничению пляски проводов расстройкой частот их крутильных и вертикальных колебаний. Техническая реализация указанного способа ограничения пляски заключается в использовании расстраивающих частоты гасителей маятников типа. Второй способ предотвращения крутильных колебаний провода при пляске – демпфирование этого вида колебаний.

Одной из наиболее перспективных систем гашения пляски одиночных проводов воздушных ЛЭП является установка комплекта маятников типа эксцентричных грузов (далее маятников-ЭГ), размещаемых по длине пролета [1, 2]. Благодаря высокой чувствительности расположенных горизонтально маятников-ЭГ к колебаниям типа пляски, суммарная масса их грузов может быть выбрана меньшей, чем, например, масса вертикальных маятников [3]. Статья посвящена исследованию схем размещения маятников-ЭГ, при которых их массы не являются чрезмерными, а эффективность гашения остается высокой.

При проектировании воздушных ЛЭП необходимо выбрать оптимальные геометрические размеры и массу маятников, а также схему их расста-

новки в пролете воздушной ЛЭП. Проведенные в России исследования показали, что наиболее целесообразна совместная установка горизонтальных и вертикальных маятников в пролете ЛЭП [2]. Более массивные вертикальные маятники предназначены для отстройки частот вертикальных колебаний провода при пляске от их крутильных колебаний. Для расстройки крутильных колебаний предлагается устанавливать горизонтальные маятники по разные стороны от вертикали, проходящей через центр кручения провода. Благодаря возбуждению разнонаправленных крутильных колебаний и изменению направления действия аэродинамических подъемных сил, являющихся причиной пляски, гасятся наиболее опасные низкочастотные колебания проводов воздушных ЛЭП.

В Белорусском национальном техническом университете разработаны математическая модель и численный метод расчета пляски одиночных проводов воздушных ЛЭП, которые используются для выполнения оценки эффективности применения маятниковых гасителей колебаний и крутильных демпферов.

Математическое описание движения проводов при пляске, представленных гибкой упругой нитью, основано на системе дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих поступательные и крутильные колебания проводов [3]. Аэродинамические силы и моменты определяются с использованием опытных аэродинамических характеристик проводов [4]. Для постановки краевой задачи динамики проводов с начальными условиями провод делится гасителями на участки. В соответствии с принципом связи механики действие проводов на гасители при пляске заменяется реакциями связей. Рассматривается совместное движение сосредоточенных масс гасителей под действием приложенных от проводов сил и распределенных масс участков проводов при заданных координатах краевых точек [4]. Для определения начального положения провода в момент возникновения пляски используются уравнения их равновесного положения, полученные из уравнений движения исключением производных по времени. Сформулирована краевая стационарная задача положения проводов до пляски и разработан численный алгоритм ее решения [5].

Особенностью численного решения краевой двухточечной задачи равновесия проводов с маятниками различного типа является использование нескольких вложенных итераций: по координатам проводов и углам установки гасителей на них. Сложность решения задачи заключается в определении такого положения горизонтальных маятников в момент монтажа, при котором они после поворота из-за недостаточной крутильной жесткости проводов заняли бы необходимое для эффективного действия при пляске горизонтальное положение. Необходимо также учесть наличие распределенных протекторов, защищающих провод в местах установки горизонтальных маятников. Трудности решения данной задачи возрастают при установке на проводе нескольких горизонтальных маятников, которые после монтажа будут иметь различные первоначальные углы в различных точках пролета воздушной ЛЭП. Для ее решения разработан численный метод определения положения проводов с гасителями-маятниками до момента возбуждения пляски. Для уменьшения невязки в разностных уравне-

ниях, обусловленной приближенным заданием начального положения провода с маятниками, расчет начальных условий производится в два этапа. Вначале определяется равновесное положение провода под действием его веса, аэродинамических сил лобового сопротивления, соответствующих заданному углу оледенения, и веса маятников. Считается, что все маятники расположены в вертикальной плоскости и результирующая нагрузка в точках их установки принимается равной

$$P_{\text{рез } i} = P + \frac{2P_{\text{м } i}}{h_i + h_{i+1}},$$

где P – вес единицы длины провода, Н/м; $P_{\text{м } i}$ – то же i -го маятника в i -й точке пролета, м; h_i – шаг разностной сетки на i -м участке провода.

В схеме неравномерной расстановки маятников в пролете участки проводов имеют неодинаковую длину. Поэтому шаги разностной схемы h_i на участках провода между гасителями будут разные. В этом случае узлы разностной схемы точно совпадают с точками установки маятников, что повышает точность оценки их влияния на пляску проводов. В соответствии с этим разностная схема численного решения уравнений начального положения проводов строится с использованием конечно-разностных формул для неравностоящих узлов сетки:

$$\bar{R}_{\text{ssi}} = 2 \frac{\bar{R}_{i+1}h_i - \bar{R}_i(h_{i+1} + h_i) - \bar{R}_{i-1}h_{i+1}}{(h_{i+1} + h_i)h_{i+1}h_i};$$

$$\bar{R}_{si} = \frac{\bar{R}_{i+1}h_i^2 - \bar{R}_i(h_i^2 - h_{i+1}^2) - \bar{R}_{i-1}h_{i+1}^2}{(h_{i+1} + h_i)h_{i+1}h_i},$$

где $\bar{R}_{\text{ssi}}$ и $\bar{R}_{si}$ – первая и вторая разностные производные по длине провода в i -м узле сетки.

Наличие защитных протекторов вблизи маятников учитывается переменными по длине провода его крутильной жесткостью и соответственно массой единицы длины провода.

На втором этапе вычисления положения провода до момента времени возбуждения пляски используются уравнения движения проводов под действием динамических моментов, обусловленных заданием необходимых монтажных углов установки горизонтальных маятников. Возникают затухающие крутильные и поступательные колебания проводов, в результате которых устанавливается близкое к равновесному положение проводов с учетом реального расположения горизонтальных и вертикальных маятников в пролете воздушных ЛЭП (рис. 1, 2). Затем с помощью ветрового импульса возбуждается пляска проводов и изучается влияние маятников на ее ограничение. Для частных случаев, например при одном маятнике в пролете, пляска может возбуждаться на втором этапе вычислений уже при задании монтажного угла маятника.

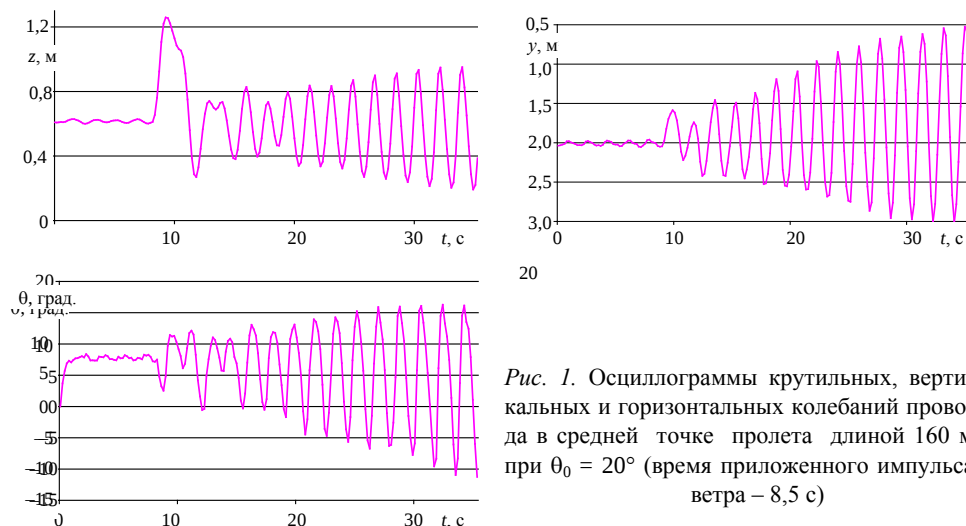


Рис. 1. Осциллограммы крутильных, вертикальных и горизонтальных колебаний провода в средней точке пролета длиной 160 м при $\theta_0 = 20^\circ$ (время приложенного импульса ветра – 8,5 с)

По разработанной компьютерной программе выполнены численные расчеты пляски воздушной ЛЭП с пролетами 100–240 м и проводами сечением 95–150 мм². Для определения аэродинамических сил использованы опытные аэродинамические характеристики [6] (рис. 3). При выборе начального угла оледенения провода θ_0 учитывались исследования, выполненные в Льежском техническом университете [6] на основе анализа известного условия неустойчивости Ден-Гартога. Численные расчеты показали, что пляска возбуждается при θ_0 , равных соответственно 90° и 230° , которые находятся в диапазоне углов, указанных в [6]. Сравнительный анализ этих углов по критерию двойных максимальных амплитуд вертикальных колебаний позволил окончательно выбрать для исследований $\theta_0 = 90^\circ$.

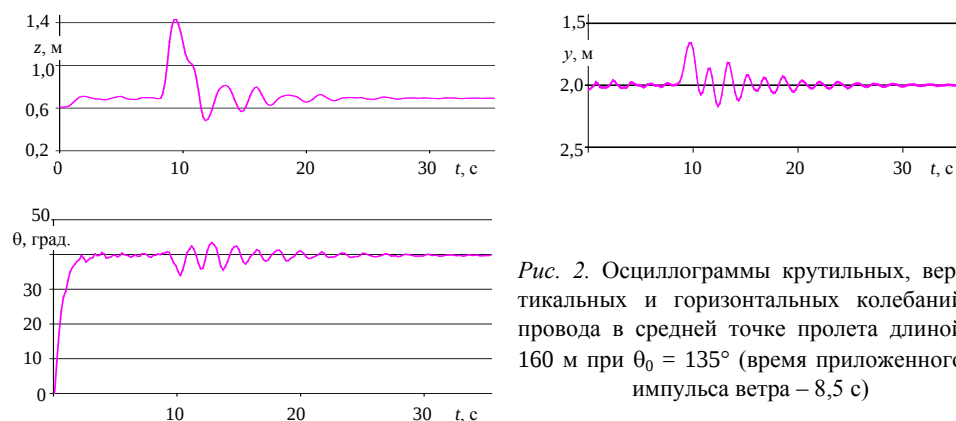


Рис. 2. Осциллограммы крутильных, вертикальных и горизонтальных колебаний провода в средней точке пролета длиной 160 м при $\theta_0 = 135^\circ$ (время приложенного импульса ветра – 8,5 с)

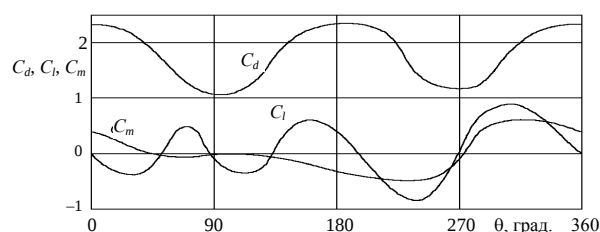


Рис. 3. Аэродинамические характеристики провода ACSR–95 мм² (Nigol)

Выполнен численный анализ для нескольких расчетных схем с маятниками. В первой расчетной схеме пролета были установлены один вертикальный маятник на расстоянии $2/3$ длины пролета, два разнонаправленных горизонтальных – по обе стороны от вертикального на расстояниях λ_1 и λ_2 и два горизонтальных маятника соответственно на расстояниях λ_1 и λ_2 от концов пролета. Во второй схеме использованы те же горизонтальные маятники, но направленные в одну сторону. В третьей схеме оценивалось влияние крутильных демпферов, которые являются составной частью комбинированных маятников, установленных вертикально. Такая схема позволяет исследовать влияние демпфирования крутильных колебаний. Варьируемым параметром являлась крутильная вязкостная жесткость демпфера f_d , измеряемая в Н·м·с/рад. В расчетах она изменялась от 0,5 до 20 Н·м·с/рад. Оценивалось также влияние механических параметров гасителей, углов их первоначальной установки и параметров λ_1 и λ_2 на ограничение и гашение возбуждаемой численным путем однополуволновой пляски проводов. Результаты расчетов представлены на рис. 4, 5 и в табл. 1, 2.

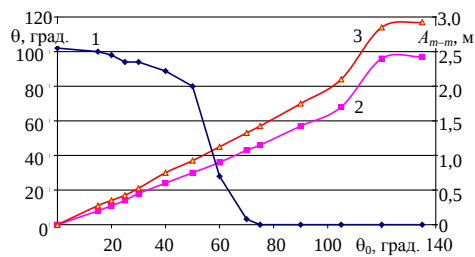


Рис. 4. Зависимости углов расположения горизонтальных маятников после монтажа и двойной амплитуды колебаний провода АС-120/19: $\lambda_1 = 18$ м; $\lambda_2 = 9$ м; 1 – A_v ; 2 – $\theta_{1,r2}$; 3 – $\theta_{3,r4}$

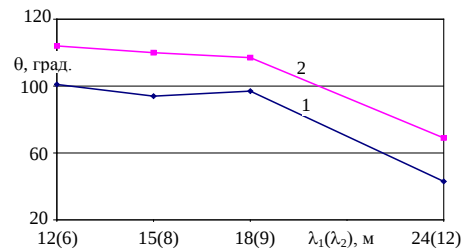


Рис. 5. Зависимости углов расположения горизонтальных маятников после монтажа от длин λ_1 (1) и λ_2 (2) при $\theta_0 = 135^\circ$

Как видно, принятая в расчетах комбинированная схема установки вертикальных и горизонтальных маятников успешно справляется с ограничением и гашением пляски при углах их первоначальной установки 70° и более (рис. 4). Имеющиеся практические рекомендации по выбору первоначальных углов установки горизонтальных маятников, равных 135° , подтверждаются расчетами. Компьютерная программа позволяет определить как углы первоначальной установки горизонтальных маятников для различных параметров λ_1 и λ_2 , так и углы их расположения после монтажа для различных схем расстановки маятников в пролете (рис. 5).

Для схемы с четырьмя горизонтальными маятниками в пролете воздушной ЛЭП обеспечивается гашение наиболее опасных низкочастотных колебаний с числом полуволн от 1 до 4. Приведенные в табл. 1, 2 результаты показывают эффективность комбинированного применения вертикальных и горизонтальных маятников для успешного гашения пляски для различных схем их расположения в пролете.

Таблица 1

**Результаты расчета пляски одиночных проводов воздушных ЛЭП
с маятниками (четыре горизонтальных и один вертикальный) при $v = 12$ м/с**

$\lambda_1, \lambda_2, \text{ м}$	Первоначальный угол установки маятников в момент монтажа / Угол окончательного положения после монтажа, град.	Характер процесса автоколебаний
$l = 100 \text{ м}; f_0 = 1,5 \text{ м}; T_0 = 320 \text{ даН}; \text{провод АС-95/16};$ $P_r = 1 \text{ кг}; l_r = 0,15 \text{ м}; P_b = 2 \text{ кг}; l_b = 0,3 \text{ м}; GJ = 1,6 \text{ даН} \cdot \text{м}^2/\text{рад}$		
$\lambda_1 = 15; \lambda_2 = 8$	90/54 – 54 – 1 – 68 + 69	Гашение
$P_r = 0,5 \text{ кг}; P_b = 1 \text{ кг}$		
15; 8	90/68 – 69 – 0,5 + 78 – 80	$A_{m-m} = 0,25 \text{ м}$
$P_r = 1,5 \text{ кг}; P_b = 3 \text{ кг}$		
15; 8	90/45 – 45 – 1 + 60 – 61	Гашение
$l = 160 \text{ м}; f_0 = 2 \text{ м}; T_0 = 800 \text{ даН}; \text{провод АС-120/19};$ $P_r = 1,5 \text{ кг}; l_r = 0,15 \text{ м}; P_b = 3 \text{ кг}; l_b = 0,3 \text{ м}; GJ = 2,4 \text{ даН} \cdot \text{м}^2/\text{рад}$		
12; 6	135/101 – 105 – 1,5 + 118 – 124	Гашение
15; 8	135/94 – 103 – 1,5 + 113 – 120	Гашение
24; 12	135/43 – 44 – 0,5 + 67 – 69	Гашение
18; 9	50/38 – 40 – 1 + 46 – 48	Нестабильность
18; 9	70/41 – 43 – 1,5 + 52 – 53	Гашение
24; 12	50/27 – 28 – 0,5 + 34 – 37	Нестабильность
24; 12	60/32,5 – 35 – 0,5 + 43 – 44	Гашение
27; 14	55/29 – 32 – 0 + 39 – 39	$A_{m-m} = 0,28 \text{ м}$
27; 14	60/29 – 32 – 0 + 39 – 39	Гашение

Сравнительный анализ результатов расчета пляски проводов с установленными на них разно- и однонаправленными маятниками показывает (рис. 6), что полное затухание колебаний для схемы с разнонаправленными маятниками происходит только при $\theta_0 = 95^\circ$ (рис. 6), в то время как в другой схеме затухание наступает уже при $\theta_0 = 30^\circ$. Причина этого заключается в значительном снижении максимальных углов крутильных колебаний проводов (на 30 % и более) в схеме с однонаправленными маятниками, что сопровождается резким уменьшением амплитуд вертикальных перемещений провода и их затухание происходит уже при $\theta_0 = 30^\circ$. В связи с этим необходимы конструктивные проработки схемы с однонаправленными маятниками и ее дальнейшее исследование.

Таблица 2

**Результаты расчета пляски одиночных проводов воздушных ЛЭП с маятниками
(четыре горизонтальных): $l = 240 \text{ м}; f_0 = 3,5 \text{ м}; T_0 = 1200 \text{ даН};$
провод АС-120/19; $GJ = 2,4 \text{ даН} \cdot \text{м}^2/\text{рад}; v = 12 \text{ м/с}$**

$P_r/l_r/P_b/l_b,$ кг/м/кг/м	Первоначальный угол установки маятников в момент монтажа / Угол окончательного положения после монтажа, град.	Характер процесса автоколебаний
Один вертикальный маятник в пролете: $\lambda_1 = 20 \text{ м}; \lambda_2 = 10 \text{ м}$		
1/0,15/2/0,3	60/30 – 35 – 3,5 + 22 – 45	$A_{m-m} = 0,365 \text{ м}$
0,5/0,15/1/0,3	60/39 – 47 – 3,5 + 46 – 52	$A_{m-m} = 1,2 \text{ м}$
1,5/0,15/3/0,3	60/19 – 30 – 3 + 34 – 40	Гашение
0,5/0,25/1/0,5	60/33 – 38 – 3,5 + 41 – 48	$A_{m-m} = 0,6 \text{ м}$
1/0,25/2/0,5	135/58 – 67 – 4,5 – 85 – 102	Гашение
1/0,15/2/0,3	135/80 – 92 – 3,5 + 100 – 117	Гашение

$P_r/l_r/P_v/l_v$, кг/м/кг/м	Первоначальный угол установки маятников в момент монтажа / Угол окончательного положения после монтажа, град.	Характер процесса автоколебаний
Два вертикальных маятника в пролете: $\lambda_1 = 10$ м; $\lambda_2 = 8$ м		
1/0,15/2/0,3	135/104 – 118 – 1 + 112 – 117 – 0 + 115 – 115	$A_{m-m} = 0,16$ м
1/0,15/2/0,3	120/84 – 94 – 0 – 95 – 98 – 0 – 98 – 100	Гашение
1/0,15/3/0,3	120/84 – 94 – 0 – 95 – 98 – 0 – 98 – 100	Гашение
2/0,15/3/0,3	120/64 – 77 – 0 + 77 – 78 – 0 + 79 – 80	Гашение
1,5/0,15/3/0,3	120/76 – 87 – 0 + 83 – 87 – 0 + 88 – 90	Гашение
Два вертикальных маятника в пролете: $\lambda_1 = 20$ м; $\lambda_2 = 10$ м		
1,5/0,15/3/0,3	120/61 – 69 – 4,5 + 78 – 60 – 4,5 + 77 – 91	Гашение
1/0,15/2/0,3	120/75 – 83 – 4 + 90 – 85 – 4 + 89 – 102	Гашение
1/0,2/2/0,4	120/65 – 73 – 4,5 + 81 – 73 – 4,5 + 72 – 95	Гашение
1/0,2/2/0,4	50/25 – 28 – 2 + 25 – 24 – 2,5 + 30 – 35	$A_{m-m} = 0,5$ м

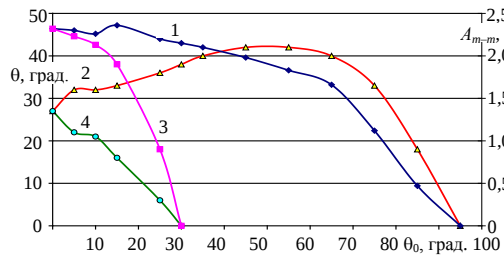


Рис. 6. Зависимости параметров пляски от первоначального угла расположения горизонтальных маятников: $\lambda_1 = 12$ м; $\lambda_2 = 6$ м; 1 – A_{m-m} при разнонаправленных маятниках; 2 – θ_m при разнонаправленных маятниках; 3 – A_{m-m} для однонаправленных маятников; 4 – θ_m для однонаправленных маятников

Оценка влияния размеров и массы маятников на наиболее опасную однополоволновую пляску выполнялась с помощью схемы с одним маятником, установленным в середине пролета (рис. 7, 8). Как видно из рисунков, большие амплитуды пляски проводов могут иметь место при меньших углах их закручивания и наоборот. Основную роль в синхронизированном колебательном движении играют моменты сил инерции провода, покрытого асимметричным гололедом. Они изменяются с частотой вертикальных колебаний и определяют частоту синхронизированных с вертикальными крутильных колебаний проводов (рис. 9).

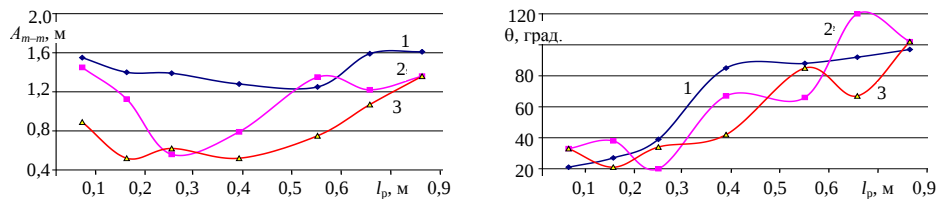


Рис. 7. Зависимости параметров пляски от длины плеча маятника, установленного в середине пролета: 1 – $P_p = 3$ даН; 2 – 5; 3 – 10 даН

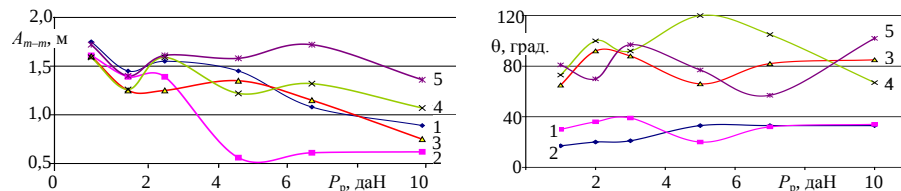


Рис. 8. Зависимости параметров пляски от массы маятника, установленного в середине пролета: 1 – $l_p = 0,15$ м; 2 – 0,321; 3 – 0,6; 4 – 0,7; 5 – 0,8 м

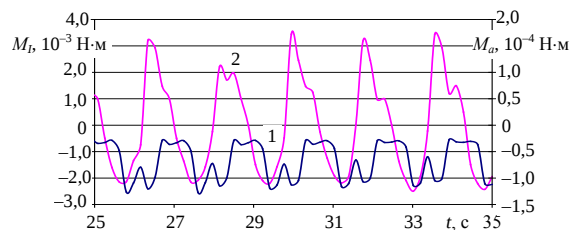


Рис. 9. Осциллограммы моментов аэродинамического (1) и сил инерции (2) провода с асимметричным гололедом

Как видно из рис. 7, 8, наиболее целесообразны к установке в середине пролета маятники с длиной рычага $l_p = 0,3$ м и массой $P_p = 5$ кг.

Для схемы с одним маятником также оценивалось влияние угла его первоначальной установки на параметры пляски провода (рис. 10). Как видно из рисунка, уже при $\theta \geq 30^\circ$ происходит успешное гашение однополуволновой пляски проводов.

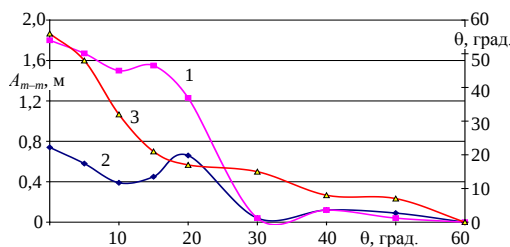


Рис. 10. Зависимости параметров пляски от угла первоначальной установки маятника, находившегося в середине пролета: $P_p = 3$ даН; $l_p = 0,15$ м: 1 – A_v ; 2 – $A_и$; 3 – θ

Частота собственных колебаний маятника определяется в основном длиной его плеча. Расчеты показывают, что при $l_p = 0,65–0,75$ м она приближается к частоте пляски провода, которая, например, для провода АС-120/19 в пролете 160 м, находится в диапазоне 0,54–0,63 Гц в зависимости от параметров и углов установки горизонтальных маятников. В результате в указанном диапазоне частот увеличиваются амплитуды крутильных колебаний. Накачка резонансных крутильных колебаний ограничивает вертикальные перемещения, так как часть энергии пляски теряется на положительных участках аэродинамических характеристик.

При оценке влияния крутильной вязкостной жесткости демпферов на параметры пляски проводов принималась схема равномерного расположения вертикальных маятников в пролете, оснащенных крутильными демпферами (рис. 11–14). Результаты показывают, что, несмотря на высокое значение крутильной вязкостной жесткости демпфера, применение четырех и более маятников в пролете не удается существенно ограничить амплитуду пляски проводов. Заметное уменьшение амплитуд колебаний имеет место при значениях крутильной вязкостной жесткости, не превышающих 10 Н·м·с/рад. При дальнейшем увеличении f_d происходит насыщение характеристик A_{m-m} из-за того, что уже почти полностью демпфированы крутильные движения маятников, а двойной диапазон крутильных колебаний проводов на участках между маятниками при трех и более маятниках не превышает 7° .

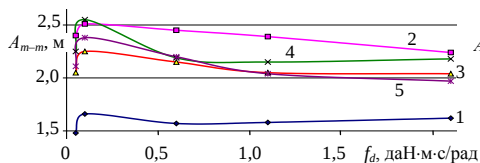


Рис. 11. Зависимости A_{m-m} от f_d для средних точек участков проводов между маятниками: 1 – $n = 1$; 2 – 2; 3 – 3; 4 – 4

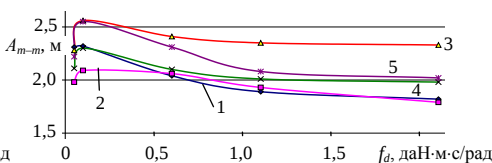


Рис. 12. Зависимости A_{m-m} от f_d для точек расположения маятников: 1 – $n = 1$; 2 – 2; 3 – 3; 4 – 4

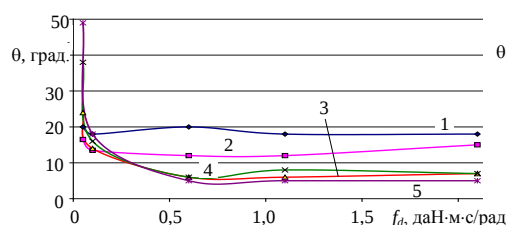


Рис. 13. Зависимости θ_{max} от f_d для средних точек участков проводов между маятниками: 1 – $n = 1$; 2 – 2; 3 – 3; 4 – 4

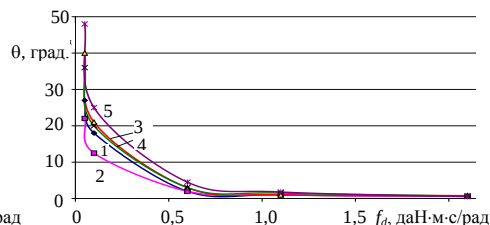


Рис. 14. Зависимости θ_{max} от f_d для точек расположения маятников: 1 – $n = 1$; 2 – 2; 3 – 3; 4 – 4

Несмотря на то, что крутильная теория пляски проводов воздушных ЛЭП подтверждается многочисленными экспериментальными и теоретическими исследованиями, нельзя сбрасывать со счетов пляску по Ден-Гарттогу, которая характеризуется полным отсутствием крутильных движений проводов. Дело в том, что в формуле угла атаки

$$\theta_a = \theta_0 + \theta + \arctg \frac{v_{ry}}{v}$$

имеется составляющая θ_v , которая называется эффективным углом атаки. Он образуется между векторами скорости ветра и относительной скорости ветра.

Численные расчеты показали, что величина θ_v при $v = 12$ м/с составляет $\pm 12^\circ$ для $\theta_0 = 90^\circ$ и $\theta_v = \pm 7^\circ$ для $\theta_0 = 230^\circ$. Этой величины угла атаки достаточно для развития пляски проводов на обоих участках характеристики даже при $\theta = 0$ (полном отсутствии крутильных колебаний). Поэтому необходимы дальнейшие исследования по проблеме пляски проводов и выбора надежных средств ее ограничения и гашения.

ВЫВОДЫ

В результате численного эксперимента для наиболее распространенных длин пролетов и марок проводов воздушных ЛЭП с одиночными проводами определены первоначальные углы установки горизонтальных маятников, при которых после монтажа они занимают положение, близкое к горизонтальному, наиболее эффективному для расстройки крутильных колебаний проводов. Найдены предельные углы откручивания горизонтальных маятников после монтажа, при которых они обеспечивают гашение пляски проводов. Обоснована схема совместной установки вертикальных и горизонтальных маятников и их параметры, при которых успешно гасятся низкочастотные колебания проводов наиболее опасных форм пляски.

ЛИТЕРАТУРА

1. H a v a r d, D. G. Detuning for controlling galloping of single conductor transmission lines / D. G. Havard // IEEE, Symposium on Mechanical Oscillations of Overhead Transmission Lines, 1979, paper No. A79 500-0.
2. П у с т ы л ь н и к о в, Л. Д. Метод гашения пляски проводов / Л. Д. Пустыльников, В. А. Шкапцов // Известия Академии наук. Энергетика. – 1992. – № 6. – С. 74–81.
3. С е р г е й, И. И. Численный метод расчета пляски одиночных проводов воздушных ЛЭП, оснащенных механическими гасителями колебаний / И. И. Сергей, П. И. Климкович, Ю. Л. Цветков // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2002. – № 5. – С. 3–10.
4. T h e S i m u l a t i o n Method of Galloping of Overhead Transmission Line. – Technical Laboratory of the Hokkaido Electric Power Co. Ltd. – Joint Meeting of UNIPED, CORECH-Galloping, 1983, Kyoto, Japan.
5. С е р г е й, И. И. Математическое моделирование гасителей колебаний расщепленных проводов воздушных ЛЭП / И. И. Сергей // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1999. – № 6. – С. 21–32.
6. S t a t e of the Art of Conductor Galloping. A Complementary Document to «Transmission Line Reference Book – Wind-induced conductor motion. Chapter 4: Conductor Galloping». Based on EPRI Research project 792. Task Force B2.11.06. June 2007. CIGRE.

Представлена кафедрой
электрических станций

Поступила 06.06.2009

УДК 621.315

ВЛИЯНИЕ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ПРИСОЕДИНЕНИЙ НА УСТОЙЧИВОСТЬ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Засл. деятель науки и техн. РБ, докт. техн. наук, проф. ПОСПЕЛОВ Г. Е.

Белорусский национальный технический университет

В электроэнергетике отмечается определяющая ее развитие тенденция интегрирования международных электроэнергетических систем в объединения – большие системы для получения дополнительных эффектов от их совместной работы. В создании объединенных систем большую роль играют электропередачи высокого и сверхвысокого напряжения. Однако с увеличением протяженности линий электропередачи усложняются условия совместной работы линии с присоединенными к ней энергосистемами, в частности проблемы обеспечения статической и динамической устойчивости, режимов напряжения и технико-экономических характеристик. Этим проблемам систем электропередачи уделяется внимание в данной статье при рассмотрении влияния на их работу промежуточных присоединений. Для электроэнергетической системы активные мощности электростанций могут быть представлены в виде [1]

$$P_i = E_i^2 y_{ii} \sin \alpha_{ii} + E_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_j y_{ij} \sin(\delta_{ij} - \alpha_{ij}), \quad (1)$$