

Модель пляски проводов ВЛ и расчет средств защиты

Фельдштейн В.А., Колосов С.В., Рыжов С.В.

ЗАО НТЦ «Электросети», 127566 Москва, Высоковольтный проезд, д.1, стр. 36

Аннотация

Предложена модель и получены условия самовозбуждения пляски проводов в ветровом потоке при гололедных отложениях. На основе данной модели исследованы возможные способы предотвращения пляски (повышения критической скорости ветра) путем целенаправленного воздействия на частоты колебаний провода с помощью системы упругих торсионных гасителей. Предложена конструкция гасителей на основе использования спиральной арматуры. Разработана динамическая схема пролета ВЛ с гасителями, положенная в основу расчета проектных параметров гасителей.

Ключевые слова: пляска проводов, гаситель пляски

1. Модель пляски провода

Рассматриваются одномодовые колебания провода по основной форме, при которых провод совершает колебания растяжения в плоскости провисания и крутильные колебания. В таком приближении провод может рассматриваться как цилиндр, закрепленный на пружинах, препятствующих вертикальному смещению цилиндра и его повороту вокруг оси (Рисунок 1).

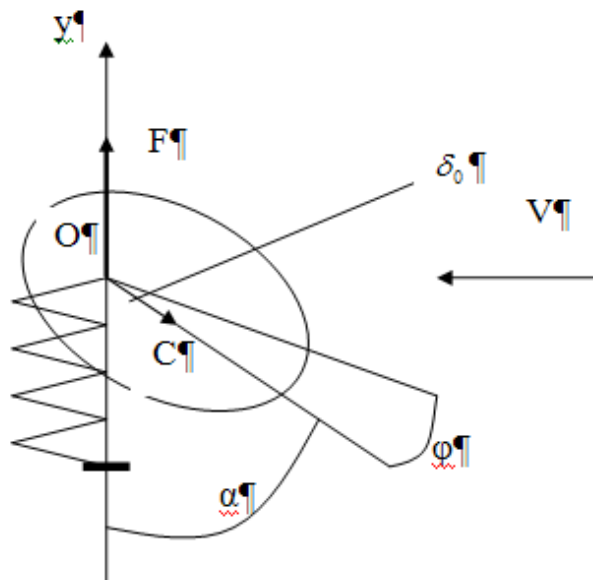


Рисунок 1

Провод имеет некруговое поперечное сечение вследствие отложения гололеда. Угол α и расстояние δ_0 определяют ориентацию центра масс C относительно центра жесткости O , принимаемого за полюс. Провод обдувается горизонтальным потоком ветра со скоростью V .

Известно, что на вращающийся цилиндр действует поперечная сила, перпендикулярная скорости потока. Если в проводе возбудились крутильные колебания, то сила Магнуса будет знакопеременной и вызовет вертикальные колебания. Если центры жесткости и массы провода не совпадают (динамическая неуравновешенность), то вертикальные колебания в свою очередь будут вызывать крутильные.

Таким образом, создается цепь обратной связи, которая может быть механизмом преобразования энергии ветра в энергию автоколебаний провода. Прежде всего, необходимо выяснить, при каких условиях равновесие провода в потоке ветра становится неустойчивым и сменяется режимом колебаний.

Сила Магнуса на единицу длины цилиндра согласно теореме Кутта-Жуковского:
 $F = \rho l \Gamma$,

где Γ – циркуляция скорости вокруг сечения цилиндра. В случае цилиндра кругового сечения, каким можно считать провод при слабом обледенении, циркуляция $\Gamma = 2S\dot{\phi}$, где S – площадь сечения цилиндра. Объединяя обе формулы, найдем:

$$F = \rho \frac{V^2}{2} l d c_y,$$

d , l – диаметр и длина цилиндра, $c_y = \pi d \dot{\phi} / V$ – коэффициент подъемной силы. Оценим коэффициент подъемной силы. При $d=0,02$ м, $V=5$ м/с, частоте крутильных колебаний 1 Гц $c_y \approx 0,1$. Это достаточно много, если учесть периодичность силы Магнуса, резко усиливающую эффект ее воздействия на провод. Линеаризованные уравнения колебаний провода имеют вид:

$$\begin{aligned} \ddot{y} + \beta_B \dot{y} + \omega_B^2 y + \delta \ddot{\phi} - \lambda \dot{\phi} &= 0 \\ \ddot{\phi} + \beta_K \dot{\phi} + \omega_K^2 \phi + \mu \ddot{y} &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь обозначено:

$$\omega_B = \frac{\pi}{l} \sqrt{\frac{T}{m} (1 + 2\beta)}, \quad \omega_K = \frac{\pi}{l} \sqrt{\frac{K_0}{\theta_0}}, \quad \beta = \frac{B}{24T} \left(\frac{mgl}{T} \right)^2$$

- парциальные частоты вертикальных и крутильных колебаний, $\beta_B = 2\Delta_B \omega_B / \pi$, $\beta_K = 2\Delta_K \omega_K / \pi$ (Δ_K, Δ_B – соответствующие логарифмические декременты), $r = \sqrt{J/m}$ – радиус инерции провода относительно оси центров жесткости, $\lambda = 2\rho_s V / \rho_{np}$, $\mu = \delta / r^2$, $\delta = \delta_0 \sin \alpha$.

Условием колебательной неустойчивости при слабом демпфировании, согласно критерию Рауса-Гурвица, является неравенство (Рисунок 2):

$$\frac{V}{V_{\min}} > \frac{1}{2} \left(\frac{\eta}{\eta_{kp}} + \frac{\eta_{kp}}{\eta} \right) = F(\eta), \quad (2)$$

где $\eta = \left(\frac{\omega_K}{\omega_B} \right)^2$ – параметр расстройки частот, $V_{\min} = \frac{\rho r^2 \sqrt{\beta_B \beta_K}}{\rho_B \delta_0 \sin \alpha}$ – минимальная

критическая скорость, соответствующая $\eta_{kp} = \sqrt{\beta_K / \beta_B}$.

Соотношение (2) определяет нижнюю границу скоростей ветра (критические скорости), при которых состояние равновесия провода становится неустойчивым с последующим развитием колебаний. Наличие минимума у функции $F(\eta)$ показывает, что при определенном (критическом) соотношении парциальных частот вертикальных и крутильных колебаний, критическая скорость ветра является наиболее низкой, то есть условия для самовозбуждения – наилучшие. Следовательно, гаситель колебаний должен увеличивать расстройку парциальных частот. Парциальная частота крутильных колебаний голого провода велика по сравнению с частотой вертикальных колебаний. Скорость волн кручения, рассчитанная по экспериментальным значениям крутильной жесткости провода составляет 2000...2500 м/с при скорости поперечной волны 100-130 м/с. Следовательно $\omega_K / \omega_B \approx 5...6$.

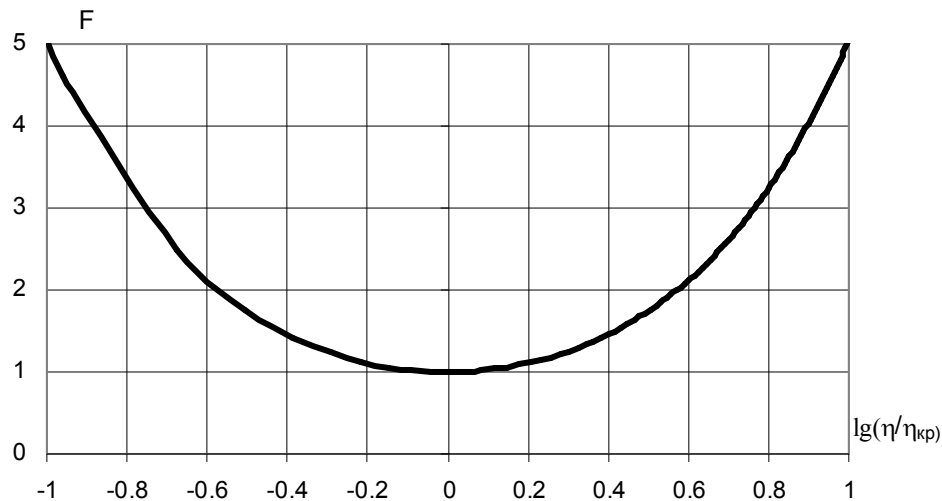


Рисунок 2

Обледенение увеличивает момент инерции провода, частота крутильных колебаний уменьшается и может приблизиться к частоте вертикальных, что способствует возбуждению пляски. Оценки показывают, что при увеличении массы провода при отложении наледи в 1,5 раза частота вертикальных колебаний уменьшается на 5%, а частота крутильных – в 3 раза. Следовательно, роль гасителей должна состоять в повышении частоты крутильных колебаний, а точнее – в компенсации ее снижения из-за обледенения провода.

2. Воздействие на частоты крутильных колебаний путем применения упругих торсионов на основе спиральной арматуры

Согласно теореме Релея, понижение частот возможно за счет увеличения массы, а повышение – за счет повышения жесткости системы. Простейший способ (абстрактный) увеличить крутильную жесткость – добавить к проводу сосредоточенные “пружинки”, в данном случае – работающих на кручение (Рисунок 3).

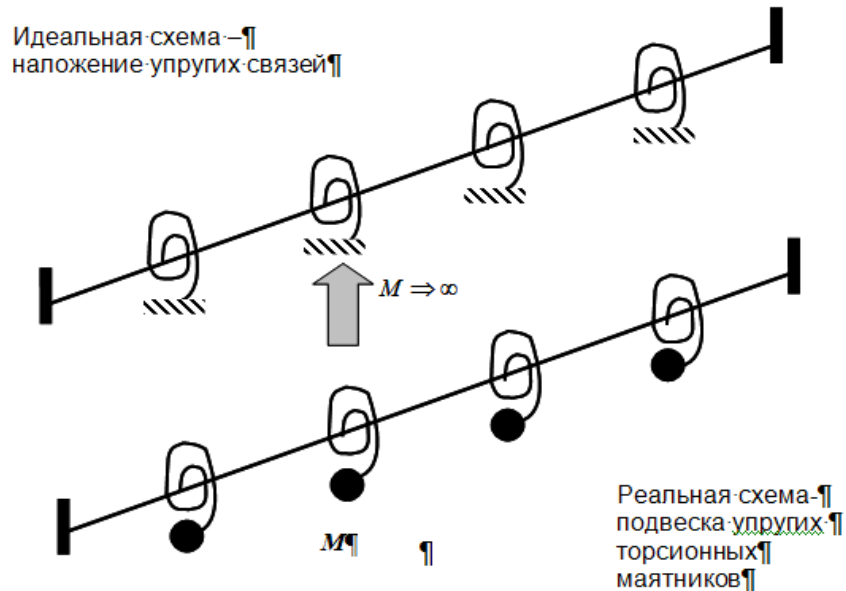


Рисунок 3

Так как закрепить пружинки на неподвижных опорах невозможно, то необходимо связать их с инертными торсионами, подобрав параметры пружинки и торсионов так, чтобы в интересующем нас диапазоне частот инерционные элементы были как можно менее подвижными. Для этого необходимо, чтобы собственная частота торсиона была мала по сравнению с основной частотой крутильных колебаний провода.

Конструктивно гаситель состоит из груза массой M , подвешенного к проводу посредством двух упругих элементов, выполненных на основе спиральной арматуры и представляющих собой пряди из $n_{\text{пров}}$ проволок диаметром d в виде дуг полуокружностей диаметром D (Рисунок 4).

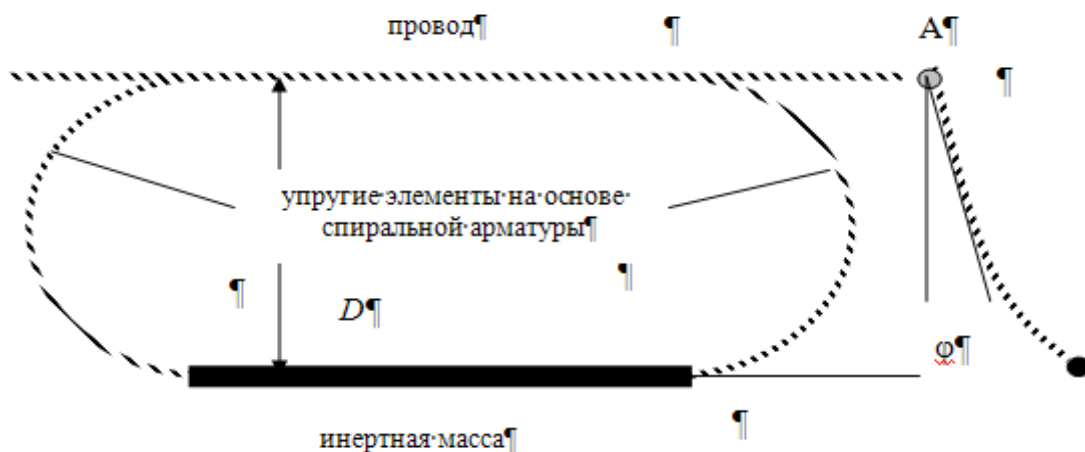


Рисунок 4

Если в пролете установлено n гасителей, общая масса которых мала по сравнению с массой провода, то частоты вертикальных колебаний практически не изменяются, а основная частота крутильных колебаний "расщепляется" на две:

$$\Omega_1 \approx \omega_C \sqrt{\lambda}, \quad \Omega_2 \approx \omega_M. \quad (3)$$

Здесь $\omega_M = \sqrt{g/D}$ - частота колебаний гасителя, свободно вращающегося вокруг точки А (маятниковые колебания), $\omega_C = \sqrt{c_z/M}$ - частота колебаний гасителя, жестко заземленного в точке А (упругие колебания). Между этими частотами существует простое соотношение, легко определяемое экспериментально:

$$\left(\frac{\omega_M}{\omega_C}\right)^2 = \frac{Mg}{Dc_z} = \frac{\Delta}{D'}$$

где Δ - статическое смещение груза под действием собственного веса при горизонтальном расположении петли гасителя. Очевидно, что из соображений прочности гаситель должен проектироваться так, чтобы это отношение было малым,

то есть $\omega_M \ll \omega_C$. Параметр $\lambda = \frac{MD^2}{\theta} \gg 1$, так как момент инерции провода мал

по сравнению с моментом инерции конструктивно приемлемого гасителя (для провода АС 120-19 в пролете длиной 250м $\theta = 0,34 \cdot 10^{-2}$ кг*м², тогда как масса в 1кг, отнесенная от оси провода на 25см, имеет момент инерции $\Theta_M = 6,25 \cdot 10^{-2}$ кг*м², то есть почти в 20 раз больше). Благодаря этому, если $\omega_C \approx \omega_K$, снижение частоты крутильных колебаний при обледенении провода может быть эффективно компенсировано установкой гасителей.

Вместе с тем, установка гасителей приводит к "расщеплению" спектра - к появлению второй частоты $\Omega_2 \approx \omega_M$. Две частоты соответствуют двум формам колебаний: провод и торсионы колеблются в противофазе с проводом на частоте Ω_1 (Рисунок 5), - и в фазе на частоте Ω_2 .

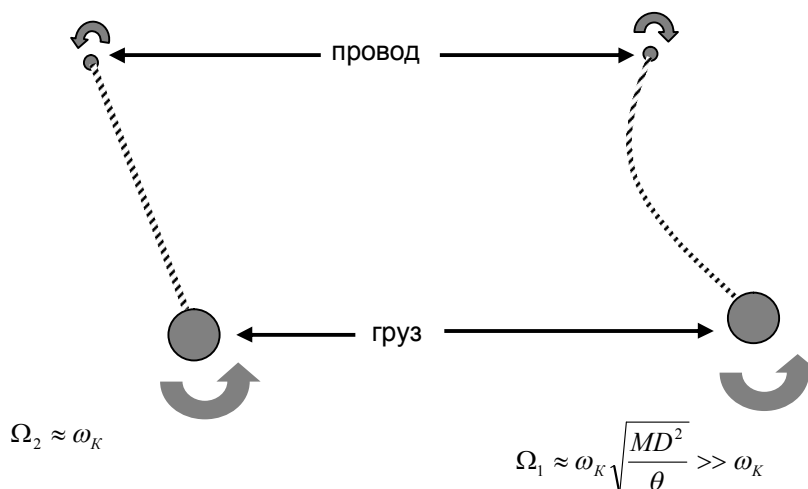


Рисунок 5

Повышение частоты крутильных колебаний, соответствующей противофазным колебаниям, сопровождается появлением возможности "паразитных" колебаний на относительно низкой и трудно регулируемой частоте, так как последняя зависит только от диаметра гасителя D , который является неудобным для регулирования частоты конструктивным параметром. Поэтому в тех конкретных случаях, когда паразитная частота крутильных колебаний оказывается в опасной близости к частоте вертикальных, необходимо искать другую динамическую схему гасителя.

Чтобы найти альтернативу, необходимо иметь в виду, что причина "неуправляемости" второй частоты состоит в том, что гаситель на второй частоте ведет себя как математический маятник, частота которого зависит только от диаметра гасителя, уменьшать который можно только до известных пределов. Поэтому предпочтительна такая динамическая схема, в которой гаситель является физическим маятником с малым (или нулевым) расстоянием центра массы от провода. При этом надо не повышать вторую частоту, уводя ее от частоты вертикальных колебаний провода, а напротив – понизить ее, сделав еще меньше. Такую возможность предоставляет динамическая схема гасителя с двумя петлями (Рисунок 6).

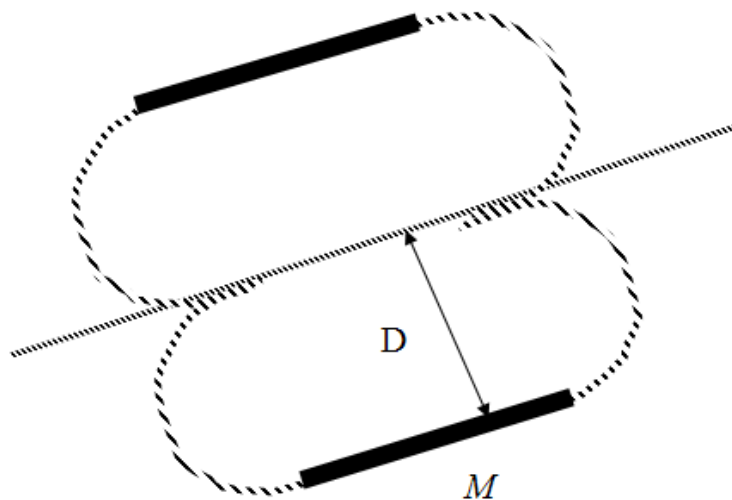


Рисунок 6

В этом случае частоты крутильных колебаний равны:

$$\Omega_1 \approx \omega_C \sqrt{2\eta} \gg \omega_K \text{ и } \Omega_2 \approx \omega_C \sqrt{\frac{1}{2\eta}} \ll \omega_K$$

Этим также достигается рассогласование частот крутильных и вертикальных колебаний.

Таким образом, установлено принципиально различное воздействие однопетлевых и двухпетлевых гасителей на частоты колебаний провода. Оба гасителя расщепляют спектр собственных частот: вместо одной частоты возникают две. Одна из них в обоих случаях существенно выше исходной частоты провода и уходит далеко за область частот пляски. Вторая, которая является в некотором смысле "паразитной", так как связана с применением гасителя, ведет себя существенно различно при однопетлевом и двухпетлевом гасителе. В первом случае она ниже исходной крутильной частоты провода и опасно приближается к частоте вертикальных колебаний. Во втором случае она понижается радикально, в той же мере, в какой повышается первая частота, причем настолько, что становится

существенно ниже частоты вертикальных колебаний. Схема воздействия гасителей на частоты провода представлена на Рисунок 7.

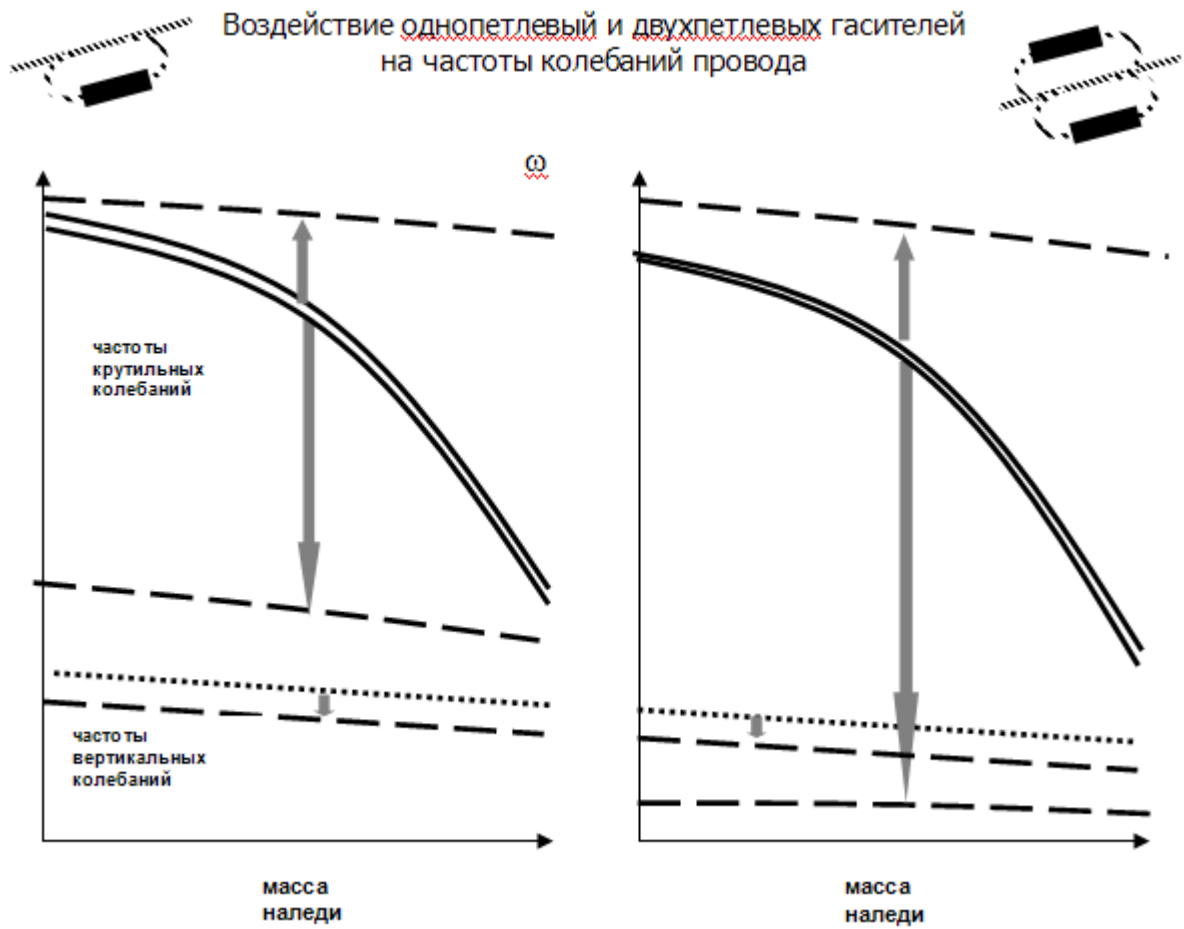


Рисунок 7

Полученные результаты позволяют перейти к выбору проектных параметров гасителей

плетки.

3. Влияние параметров гасителя на устойчивость провода

Выше была определена минимальная скорость ветра (2), при которой возможно самовозбуждение колебаний провода. Отсюда следует, что возможны два пути повышения устойчивости, или увеличения критической скорости ветра (Рисунок 8):

- повышение минимальной критической скорости V_{\min} , зависящей от конструкции гасителя.
- увеличение коэффициента $F(\eta)$, зависящего от расстройки парциальных частот вертикальных и крутильных колебаний.

Два способа повышения устойчивости провода

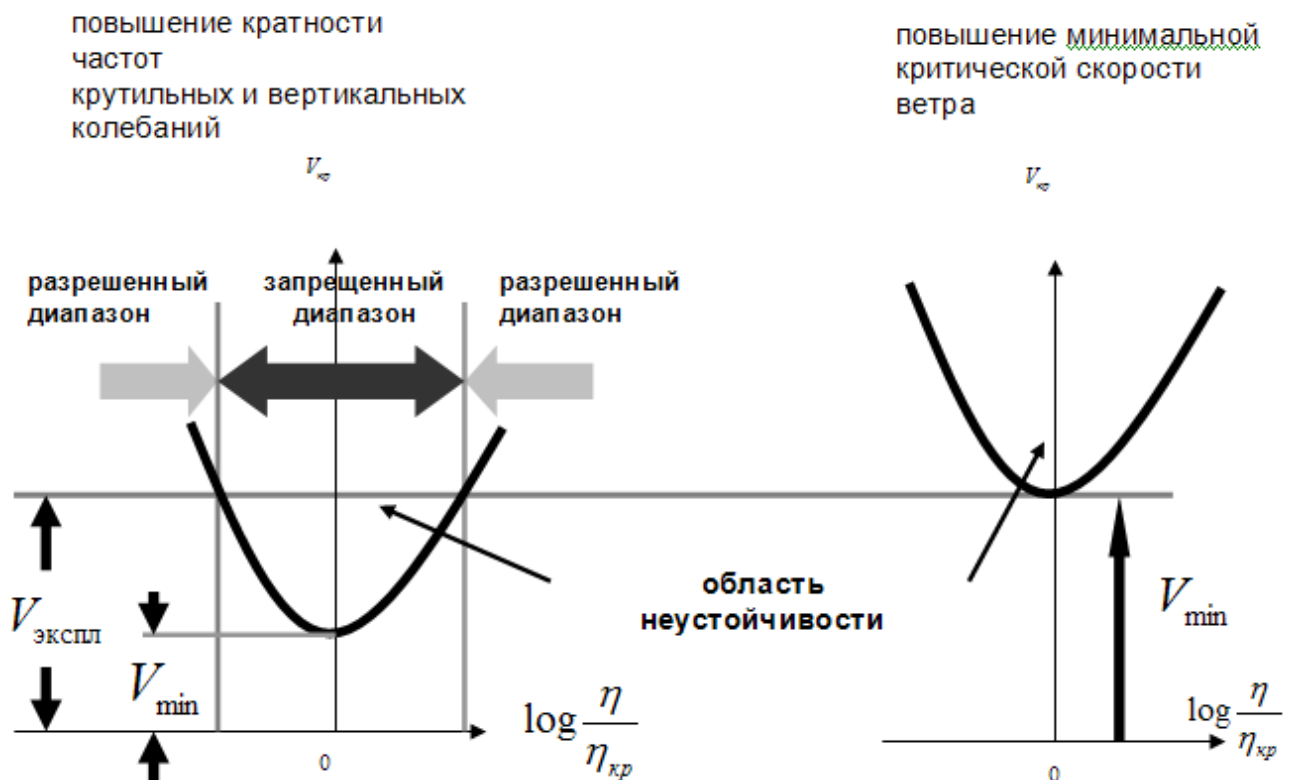


Рис. 8

Проанализируем возможности каждого из этих способов.

А) Увеличение минимальной критической скорости ветра.

Эта цель достигается конструктивными мерами, не связанными с частотными характеристиками гасителя:

- путем уменьшения эксцентриситета гасителя;
- путем уменьшения отклонения его плоскости гасителя от вертикали.

При однопетлевой схеме возможен второй путь. Он реализуем, хотя есть практические причины, которые могут помешать его реализации:

- невозможность точной вертикальной установки гасителя при монтаже, производимом на земле,
- отклонение плоскости гасителя от вертикали под действием ветра.

Жесткости провода гаситель займет нижнее положение. Вторая причина в принципе неустранима, но угол отклонения обычно невелик и этим можно пренебречь.

При двухпетлевой схеме возможен первый путь повышения минимальной критической скорости: уменьшение эксцентриситета по возможности до нуля. Он реализуем, причем ориентация плоскости гасителя по отношению к вертикали в данном случае несущественна. Некоторое нарушение симметрии возможно вследствие неравномерного обледенения петель гасителя. Однако большой момент инерции грузов гасителя должен эффективно парировать этот эффект.

Б) Рассогласование частот вертикальных и крутильных колебаний

Эта цель достигается выбором собственных частот гасителя. Этот способ затруднен тем, что наиболее неблагоприятная (критическая) кратность парциальных частот, при которой критическая скорость ветра минимальна, зависит от соотношения коэффициентов демпфирования крутильных и вертикальных колебаний. На практике эти величины плохо известны, особенно в области низких частот колебаний, характерных для пляски. Поэтому на данном этапе, при недостатке экспериментальных данных, эта зависимость была проанализирована качественно, для правдоподобных диапазонов изменения логарифмических декрементов колебаний: $0,002 < \Delta_B, \Delta_K < 0,02$. Расчеты показывали, что даже в достаточно широком диапазоне изменения декрементов колебаний критическая кратность частот меняется достаточно слабо: $\omega_K / \omega_B = 0,6 \dots 1,7$. Расстройка частот повышает качество гасителя во всех случаях, когда она достигается превышением крутильной частоты над вертикальной, и наоборот. Анализ расчетных результатов показал также, что качество гасителя несколько выше, если расстройка частот достигается преобладанием крутильной частоты над вертикальной. Качество однопетлевого гасителя снижается с ростом его диаметра, а качество двухпетлевого гасителя повышается с ростом диаметра.

На рисунке 9 приведены сравнительные характеристики однопетлевых и двухпетлевых гасителей.

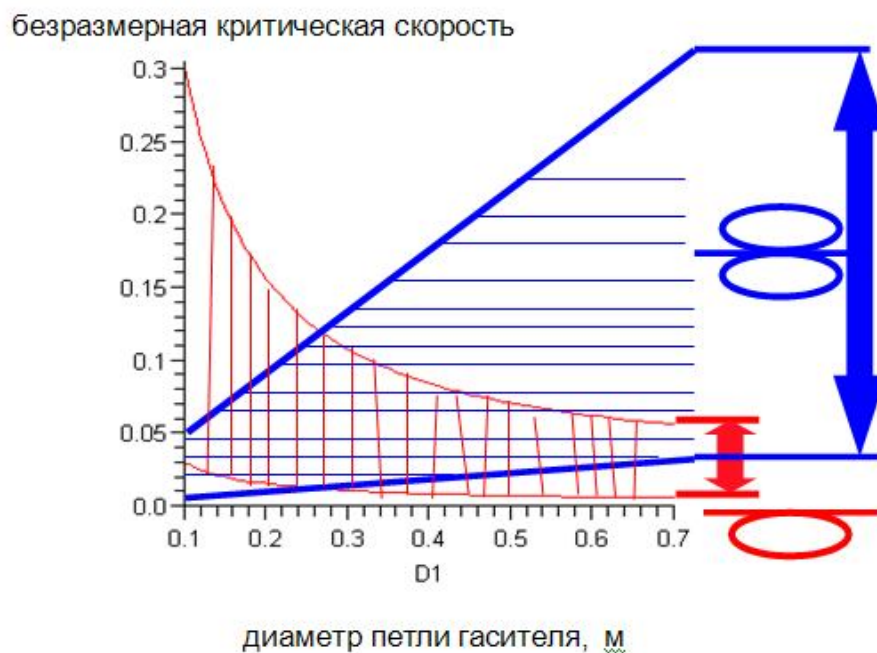


Рисунок 9. Сравнительная характеристика однопетлевых и двухпетлевых гасителей

Здесь показаны области изменения параметра эффективности в зависимости от диаметра гасителя и от величин декрементов колебаний при их изменении в указанных ранее пределах. Верхние границы области соответствуют наибольшим, а

нижние – наименьшим значениям декрементов колебаний. Расчеты показывают, что области сравнимой эффективности обоих типов гасителей близки между собой. Эти области расходятся в том диапазоне диаметров гасителей, которые нельзя считать рациональными из конструктивных и эксплуатационных соображений. Гаситель с петлей диаметром порядка 1 м неудовлетворителен по габаритам, а с диаметром порядка 0,1 м не удовлетворяет условиям применимости модели, являющейся основой динамической схемы гасителя. Необходимо иметь в виду и то, что эффективность гасителя существенно зависит от демпфирования, которое в данной конструкции гасителя является неконтролируемым.

Важным свойством обоих типов гасителей является то, что они делают частоты колебаний провода нечувствительными к гололеду: частота крутильных колебаний практически перестает зависеть от присоединенной массы наледи.

4. Выводы

Результаты проведенного исследования позволяют сформулировать ряд рекомендаций по выбору конструкции гасителя пляски на основе спиральной арматуры (численные значения параметров гасителя соответствуют проводу, близкому по характеристикам к АС 120-19 в пролете длиной 200...300м):

1. Гаситель пляски должен состоять из одного или двух жестких грузов, которые с помощью петель спиральной арматуры крепятся к проводу.
2. Спиральная прядь должна состоять из 4-5 стальных проволок диаметром 3-4 мм.
3. Диаметр однопетлевого гасителя должен быть 0,2-0,5м, масса груза 3-5кг.
4. Диаметр двухпетлевого гасителя должен быть 0,3-0,6м, общая масса одинаковых грузов 3-5кг. Обе петли должны лежать в одной плоскости.
5. Длина груза/грузов должна составлять 0,9-1,1м.
6. Однопетлевые гасители желательно устанавливаться вертикально.
7. Число гасителей в пролете должно быть нечетным, не менее 3 на пролет длиной 200...250м; гасители должны устанавливаться равномерно по пролету.