

# ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ГАСИТЕЛЕЙ ВИБРАЦИИ

*Б.М. Жуков, к.т.н., начальник отдела виброзащитных устройств ЗАО «МЗВА»*

При воздействии знакопеременных нагрузок, возникающих при ветровой вибрации проводов, происходит усталостное разрушение алюминиевых проволок провода. Задачей гашения вибрации проводов является снижение напряжений до уровня, при котором разрушение проволок происходит на менее чем через  $10^8$  циклов вибрации [1]. Гашение достигается путем установки на провода специальных устройств – гасителей вибрации. Эффективность гасителя того или иного типа проверяется с помощью различных расчетных и экспериментальных методов. Наиболее надежным является проведение натурных испытаний гасителей вибрации на действующих ВЛ с измерением возникающей в реальных условиях вибрации с помощью специальных устройств. Данный способ обладает высокой достоверностью, однако, его реализация требует значительного времени и затрат. Менее трудоемкими являются лабораторные методы оценки эффективности гасителей. Испытания проводятся на стендах различной длины (от 30 до 100 м). Вибрация, вызываемая ветром, имитируется с помощью возбудителя вибрации, позволяющего создать колебания с частотой и амплитудой, соответствующими условиям, возникающим на ВЛ. Методики данных испытаний приведены в соответствующих стандартах [2] и могут быть использованы как для испытания проводов, тросов и кабелей на воздействие вибрации, так и для оценки эффективности гашения вибрации. В соответствии с [1] допускаемые напряжения (предел усталости алюминиевых проволок провода) принимаются равными 10 МПа при числе циклов испытаний  $10^8$ . Данный способ оценки при высокой достоверности имеет недоста-

ток – большую продолжительность испытаний. Помимо методов оценки с помощью ресурсных испытаний, разработаны способы оценки гасителей вибрации, основанные на определении энергетических характеристик провода и гасителя [3].

Однако, оценить не только эффективность гашения, но и долговечность провода можно, используя методику, изложенную в [1], и основанную на уравнении:

$$\sigma = 0,25 (d_a E_a p^2) Y_b / (e^{px} - 1 + px), \quad (1)$$

где:

$$p = (H/EI)^{1/2} \quad (2)$$

$d_a$  – диаметр алюминиевых проволок наружного повива провода;

$E_a$  – модуль упругости алюминия;

$x$  – расстояние от точки фиксации провода до места измерения ;

$Y_b$  – амплитуда колебаний (пик-пик) в точке с координатой « $x$ »;

$H$  – тяжеие провода;

$EI$  – жесткость провода.

Путем несложных преобразований формулы (1) получаются зависимости напряжений от частоты колебаний, угла вибрации и т. д. С помощью (1) можно оценить долговечность незащищённого провода и провода с тем или иным гасителем вибрации [1]. Однако, формула (1) имеет существенный недостаток. В формулу (2) входит жесткость провода. В работе [1] предлагаются две зависимости для определения жесткости провода:

$$E \cdot I_c = \sum E_i (I_{0_i} + A_i \cdot (r_n^i)^2 \cdot \sin^2(\alpha_i)), \quad (3)$$

## ■ Другие вопросы

где  $I_{0_i}$  — момент инерции  $i$ -й проволоки относительно собственной оси,  $A_i$  — площадь сечения проволоки, а  $r_n^i$  — расстояние от нейтральной оси проволоки до нейтральной оси провода.

$\alpha_i$  — угол между осью симметрии провода и лучом, соединяющим центр  $i$ -проволоки с центром провода;

$$E \cdot I_c = \sum (E_i \cdot I_{0_i}), \quad (4)$$

где  $I_{0_i}$  — модуль упругости  $i$ -проволоки.

Значения жесткости, определенные по формулам (3) и (4), отличаются в несколько раз, причем, по формуле (3) вычисляется наибольшее из всех возможных значений, а по формуле (4) — наименьшее.

В работе [1] указывается, что реальное значение жесткости провода зависит от множества факторов: силы трения между проволоками, тяжения, конструкции провода (диаметра проволок, числа повивов, кратности шага скрутки), амплитуды колебаний.

Таким образом, для расчетного определения напряжений необходимо экспериментально определить два параметра  $EI$  и  $Y_b$ . Если второй параметр определить в условиях лабораторного эксперимента достаточно просто, то определение жесткости требует фактически измерения напряжений.

Непосредственное измерение напряжений в проволоках провода является вполне разработанной процедурой, однако требует значительных затрат времени.

В данной работе сделана попытка оценить напряжения в проволоках наружного повива провода на основании экспериментальных значений амплитуды колебаний ( $Y_b$ ).

В основе расчета лежит представление проволоки наружного повива провода в виде одиночной спирали, изгибаемой моментом, при этом величина прогиба в соответствующей точке спирали равна  $Y_b$  и определяется экспериментально.

Подобный подход изложен в работе [4]. Использовать данный подход можно, если рассмотреть участок провода, непосредственно примыкающий к фиксирующему зажиму испытательного стенда или к зажиму на линии электропередачи, в виде консольной балки. Провод в пролете заменяется изгибающим моментом:

$$M_i = M \sin \omega t$$

$M$  — амплитудное значение момента.

Эквивалентные напряжения, возникающие в спирали при изгибе, определяются зависимостью:

$$\sigma_i = K_1 M / W \quad (5)$$

$$K_1 = [(K_y - K_z)^2 + K_y K_z + 0,75 K_{yz}^2]^{1/2}$$

$$K_y = \sin \alpha \cos^2 \alpha (r/R) [0,154 + 0,342 (r/R) \cos^2 \alpha]$$

$$K_z = \sin \alpha [1 + 0,871 (r/R) \sin \alpha \cos^2 \alpha + 0,61 (r/R)^2 \cdot \sin \alpha \cos^4 \alpha]$$

$$K_{yz} = \cos \alpha [1 + 0,635 (r/R) \cos^2 \alpha + (0,346 \cos^2 \alpha + 0,183 \sin^2 \alpha (r/R)^2 \cos^2 \alpha)],$$

где  $W = \pi r^3 / 4$  — момент сопротивления сечения проволоки наружного повива провода;

$r$  — радиус проволоки наружного повива провода;

$R$  — расстояние между центром провода и центрами проволок наружного повива;

$$M = 3 Y_b B / x^2$$

$$B = \sin \alpha / [(1 + \sin^2 \alpha) / 2 E_a I_p + \cos^2 \alpha / 2 G_a I_p]$$

$\alpha$  — угол подъема спирали (наружного повива провода);

$I_p, I_p$  — момент инерции и полярный момент инерции сечения проволоки наружного повива провода соответственно;

$G_a$  — модуль сдвига алюминия.

Рассмотрим расчет напряжений с помощью формул (1) и (5) для провода АС 185/43 ГОСТ 839-80. На испытательном стенде были проведены измерения напряжений в процессе искусственного возбуждения колебаний на выше упомянутом проводе. Для проведения расчетов по формуле (1) необходимо определить фактическое значение жесткости провода. Экспериментальное значение жесткости провода АС 185/43 при тяжении 20000 Н определяли на основании экспериментального определения напряжений в проволоке верхнего повива провода в точке, отстоящей на расстоянии 89 мм от фиксирующего зажима, амплитуды колеба-

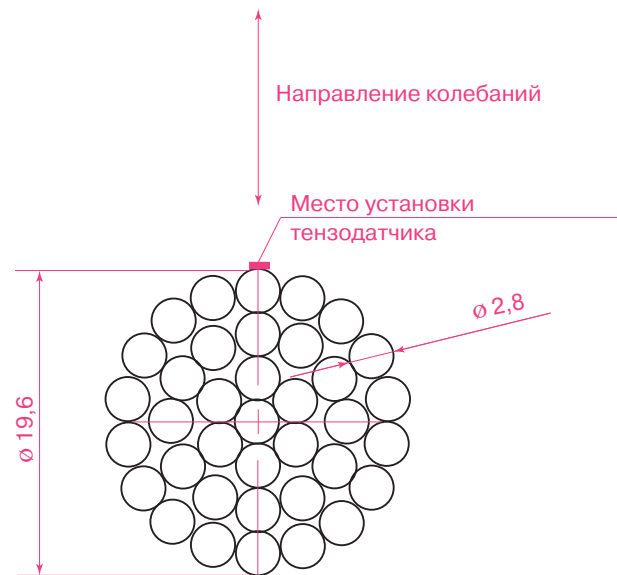


Рис. 1. Место установки тензодатчика на проволоке внешнего повива провода АС 185/43

ний провода в этой же точке; значения параметров фиксировались при резонансных значениях частоты колебаний провода. Место расположения тензодатчика, с помощью которого измеряли напряжения, показано на рис. 1. Испытания проводились на стенде с длиной пролета провода 45 м.

Внешний вид испытательного стенда приведен на рис. 2. Зная величины амплитуды и напряжений, можно, решая уравнение (1) относительно  $p$ , определить зависимость жесткости провода от частоты колебаний. Данная зависимость приведена на рис. 3.



Рис.2. Стенд для вибрационных испытаний

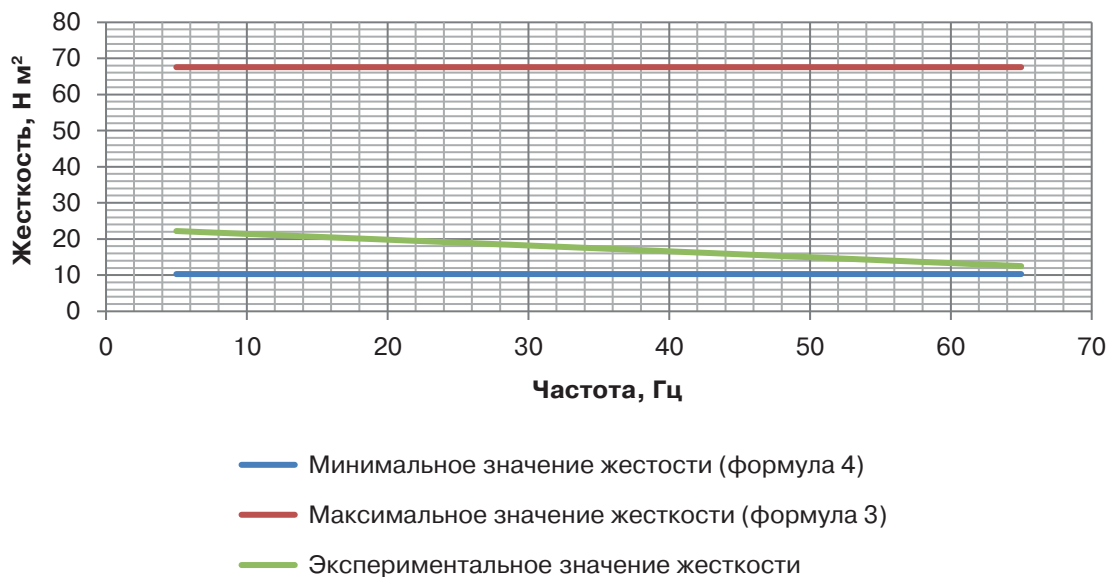


Рис. 3. Зависимость жесткости провода АС 185/43 от частоты

## ■ другие вопросы

Как видно из графиков на рис.3 экспериментальное значение жесткости в 1,2–1,6 раза превышает минимальное значение жесткости и в несколько раз меньше максимального значения жесткости.

Таким образом, для определения напряжений по формуле (1) необходимо либо заведомо завышать или занижать расчетные значения напряжений, используя для определения жесткости формулы (3) и (4), либо экспериментально определять напряжения и амплитуды, либо жесткость провода и амплитуды. Для проведения расчетов по формуле (5) достаточно экспериментально определить амплитуду колебаний в некоторой точке, и на основании определенной амплитуды определить величину напряжений. Следует отметить, что формулу (5) можно использовать для участков провода, непосредственно прилегающих к зажимам, там, где провод можно рассматривать как балку. Провод можно рассматривать как балку на расстоянии приблизительно десяти его диаметров, точка измерений (89 мм) практически для всех проводов попадает на данный участок.

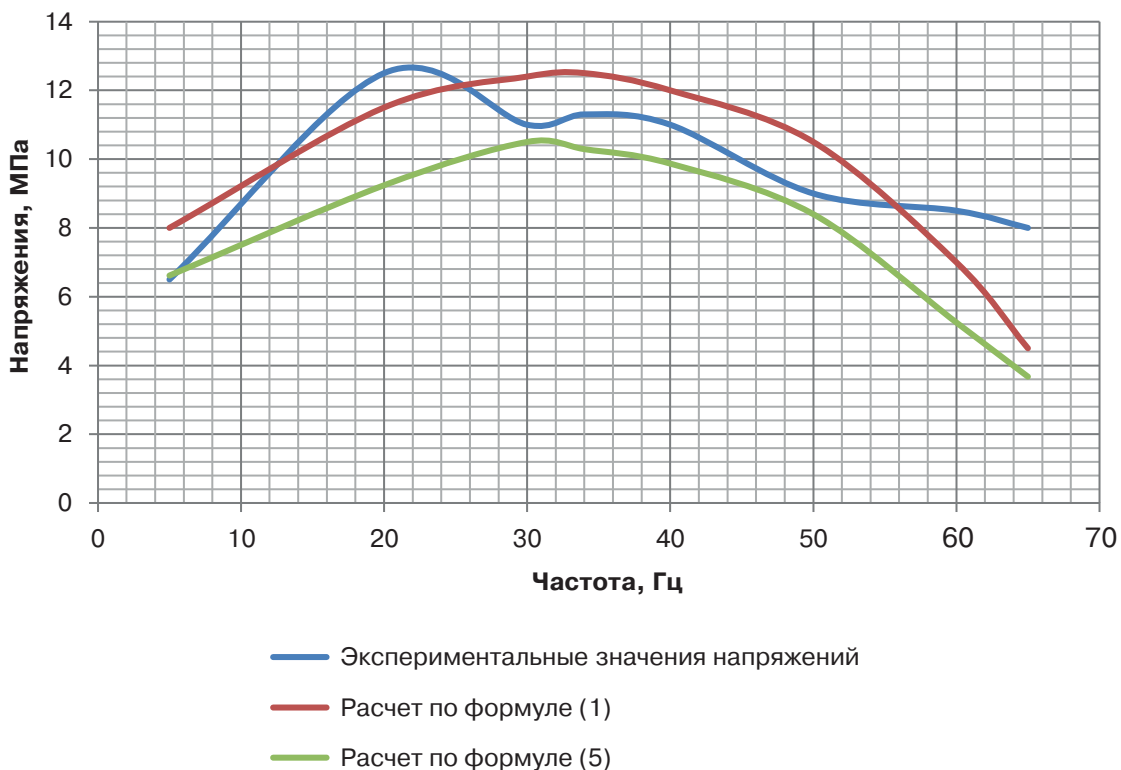
Следует отметить, что формулу (1) можно использовать только для той точки провода, в которой

определены амплитуда колебаний и напряжения в проволоке, а формулу (5) на всем участке десяти диаметров, измерив амплитуду в соответствующей точке.

Были проведены расчеты напряжений по формуле (5) для ряда проводов марки АС в зависимости от частоты и амплитуды колебаний. Расчеты проводились на основании результатов стендовых испытаний, в результате которых определялась зависимость амплитуды колебаний провода от частоты. Результаты расчета напряжений по формулам (1) и (5), а также результаты непосредственных измерений напряжений на проводе АС 185/43 приведены на рис. 4.

Величина амплитуды колебаний в пучности может быть определена методом энергетического баланса, который в нескольких различных редакциях изложен в работах [1,3]. Амплитуда колебаний провода определяется из условия равенства мощности ветра и мощности рассеивания (мощности самодемпфирования провода).

Согласно [1] опасным значением амплитуды знакопеременных напряжений в проволоках наружного повива для сталеалюминевых проводов (прово-



**Рис. 4.** Зависимость напряжений в проволоке наружного повива провода АС 185/43 в точке, отстоящей на 89 мм фиксирующего зажима, в зависимости от частоты

да марки АС по ГОСТ 839-80) является величина 10 МПа. Во время экспериментов колебания искусственно возбуждались на проводе с амплитудой согласно рекомендациям, приведенным в [1], при которой в проволоках незащищенного провода возникают напряжения от 10 до 14 Мпа. В процессе испытаний фиксировалась величина силы тока, протекающего в цепи возбудителя вибрации. При этом согласно [1] выполняется соотношение:

$$fy_{\max} = 54, \quad (6)$$

где  $y_{\max}$  — амплитуда «пик-ноль» в пучности.

При возбуждении колебаний незащищенного провода поддерживалась такая амплитуда  $y_{\max}$ , чтобы соотношение (6) выдерживалось с точностью  $\pm 10\%$ . Для сравнения проводились испытания с амплитудами меньшими  $y_{\max}$ .

Аналогичным образом, измерив величину амплитуды колебаний провода, можно определить величину напряжений в проводе при наличии гасителя вибрации, при этом сила тока возбудителя колебаний устанавливалась равной силе тока при испытаниях незащищенного провода. В данной работе рассматривались результаты испытаний проводов с резонансными гасителями типа ГВ (гасители Стокбриджа) производства ЗАО «МЗВА». Внешний вид гасителя приведен на рис. 5.

В обозначении гасителя введены следующие параметры: масса грузов, диаметр демпфирующего троса, длина гасителя. Например, гаситель марки ГВ-1,6/1,2- 11-500, имеет следующие характери-

сти: два груза весом 1,6 и 1,2 кг соответственно, трос диаметром 11 мм, длина гасителя 500 мм.

Зависимость напряжений в точке  $x = 89$  мм при испытаниях провода АС 185/43 с гасителем вибрации ГВ-1.6/1.2-11-500 приведен на рис. 6. Применение гасителя снижает уровень напряжений практически во всем диапазоне частот до безопасного уровня.

Для провода марки АС 120/27 были проведены измерения амплитуды колебаний при различных увеличивающихся значениях мощности возбуждения. При этом фиксировались зависимости амплитуды колебаний в точке  $x = 89$  мм —  $y_1 < y_2 < y_3$  ( $y_{\max}$ ). Для этих значений амплитуды по формуле (5) рассчитывались напряжения. Зависимости напряжений от частоты приведены на рис. 7.

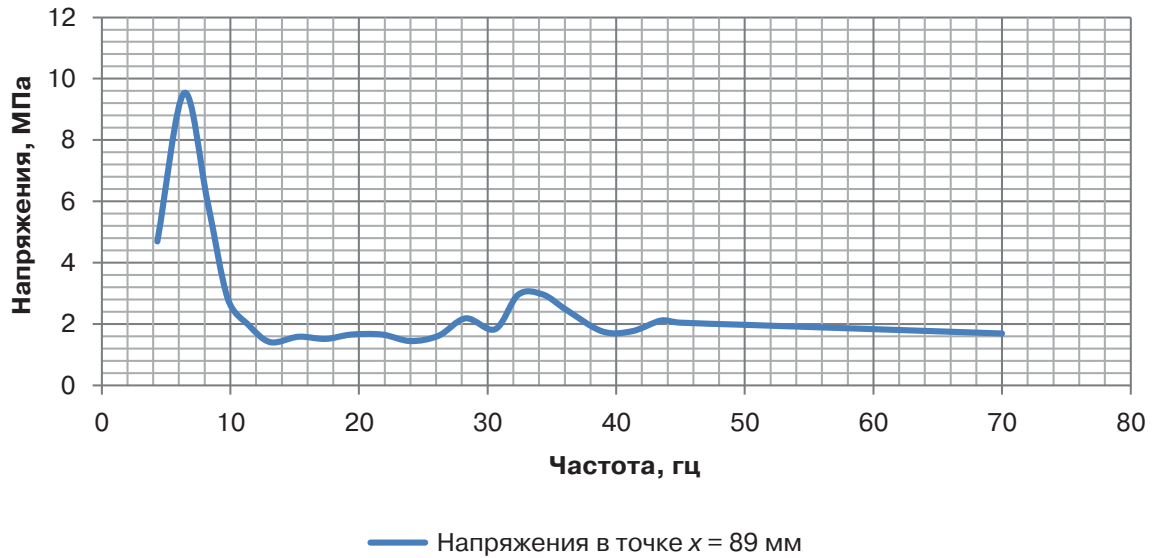
Аналогичные испытания (определение амплитуды в точке  $x = 89$  мм) были проведены на проводе АС 120/27 с установленным на нем гасителем вибрации марки ГВ-0.8-9.1-350, при этом амплитуда  $y_{11}$  соответствует силе тока, обеспечивающей амплитуду колебаний незащищенного провода  $y_1$ , а амплитуда  $y_{31}$ , силе тока для амплитуды  $y_3$  ( $y_{\max}$ ). Зависимости напряжений, рассчитанных по формуле (5) приведены на рис. 8. Гаситель вибрации обеспечивает снижение величины напряжений до безопасной величины.

Предлагаемый метод расчета позволяет непосредственно оценить эффективность гасителя вибрации путем сравнения значений напряжений в проволоках наружного повива провода с использованием

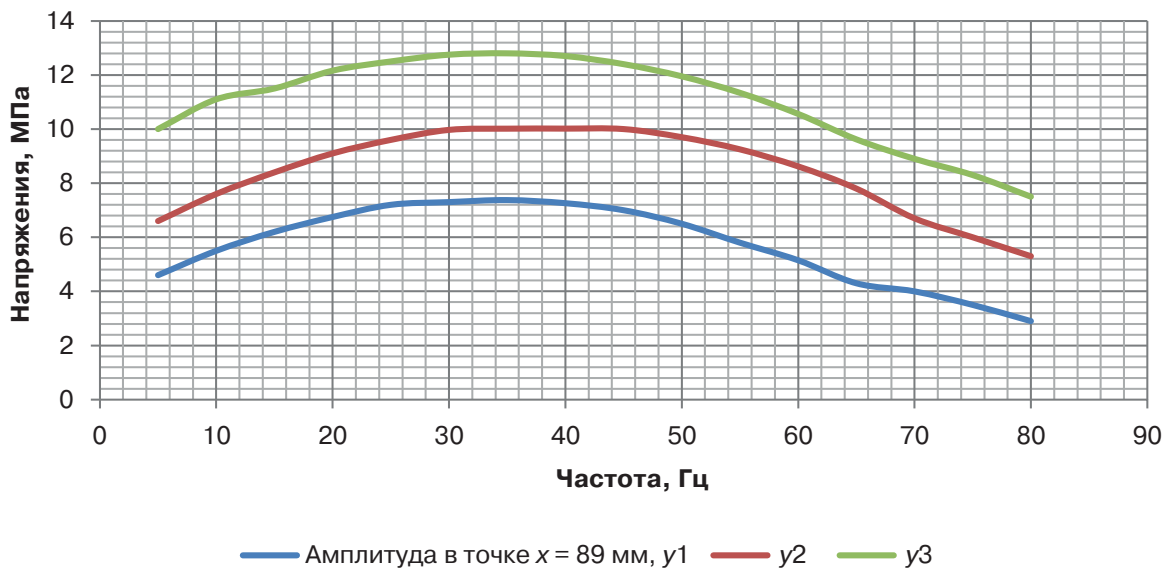


Рис. 5. Гаситель вибрации ГВ-2.4-1.6-13-550 на проводе

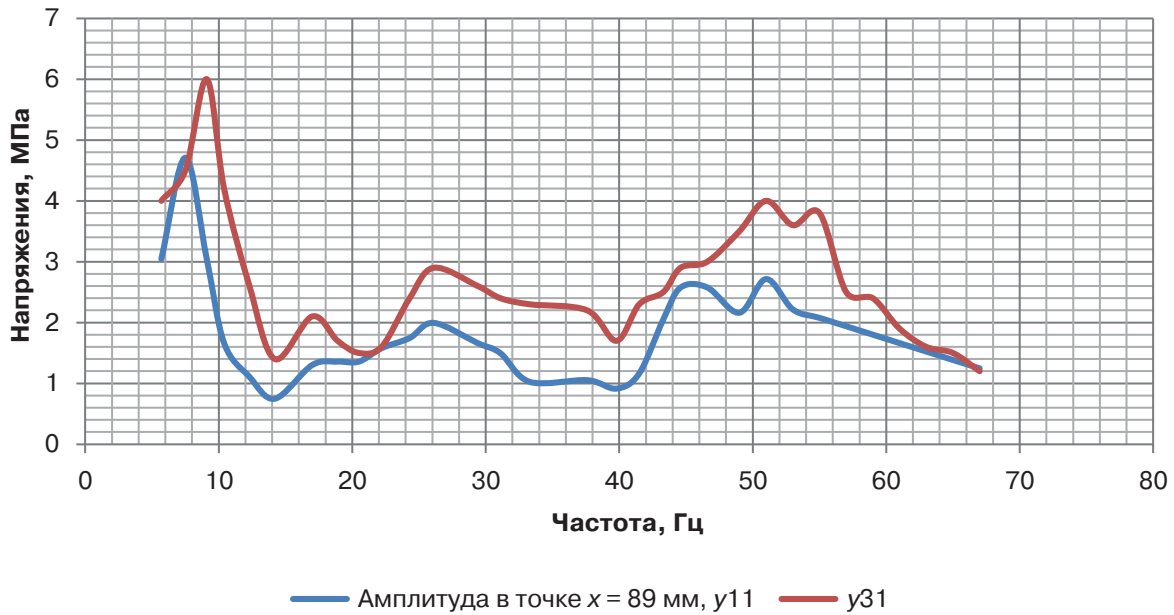
## ■ другие вопросы



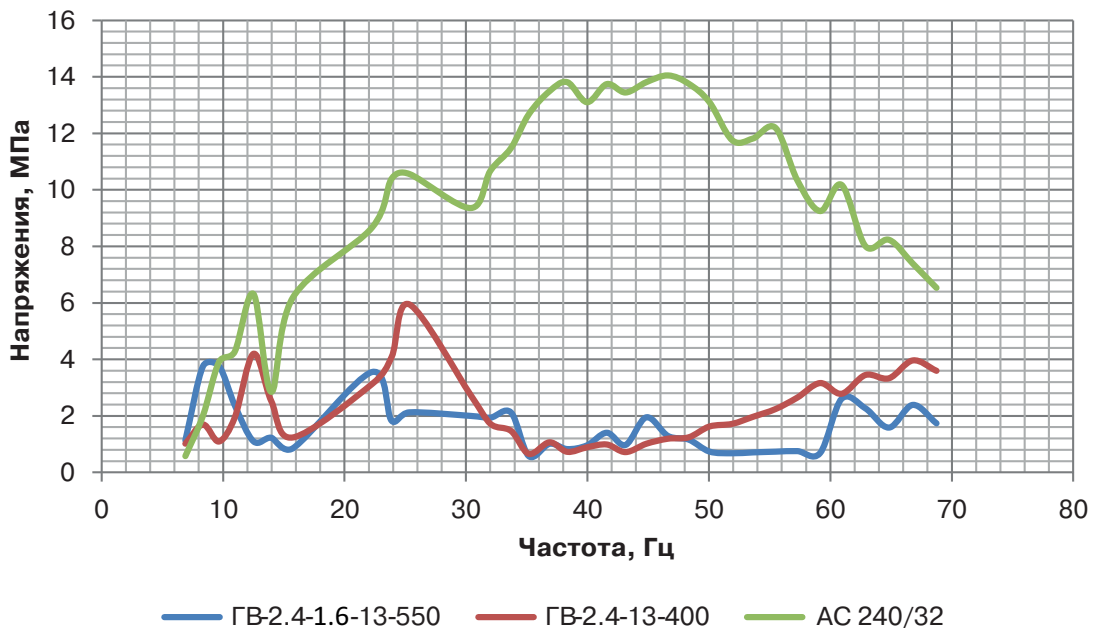
**Рис. 6.** Зависимость расчетных напряжений в проволоках наружного повива провода АС 185/43 с установленным на провод гасителем вибрации ГВ-1.6/1.2-11-500 от частоты колебаний и амплитуды в точке, отстоящей на расстоянии 89 мм от фиксирующего зажима



**Рис. 7.** Зависимость расчетных напряжений в проволоках наружного повива провода АС 120/27 от частоты колебаний и амплитуды в точке, отстоящей на расстоянии 89 мм от фиксирующего зажима



**Рис. 8.** Зависимость расчетных напряжений в проволоках наружного повива провода АС 120/27 с установленным на провод гасителем вибрации ГВ-0.8-9.1-350 от частоты колебаний и амплитуды в точке, отстоящей на расстоянии 89 мм от фиксирующего зажима



**Рис. 9.** Зависимость расчетных напряжений в проволоках наружного повива незащищенного провода АС 240/34 и провода с установленными гасителями вибрации от частоты колебаний и амплитуды в точке, отстоящей на расстоянии 89 мм от фиксирующего зажима (расчеты по формуле (5))

минимального количества экспериментов, ограничившись только измерениями амплитуды колебаний в точке  $x = 89$  мм. Расчеты по формуле (5) позволяют оперативно оценить эффективность гасителя. Недостатком данного расчетного метода является невозможность его использования для самонесущих оптических кабелей связи.

Как видно из графиков на рис. 6–9 применение гасителей вибрации типа ГВ приводит к снижению напряжений до безопасного уровня, а применение гасителей с несимметричным расположением грузов разной массы относительно зажима гасителя позволяет дополнительно снизить напряжения в проволоках в некоторых диапазонах частот до двух раз.

### Литература

1. EPRI Transmission Line Reference Book: Wind-Induced Conductor Motion. 2006.
2. МЭК 61897-1998. Воздушные линии электропередачи- требования к гасителям эоловой вибрации Стокбриджа и их испытания.
3. Яковлев Л.В. Вибрация на воздушных линиях электропередачи и методы защиты проводов и грозозащитных тросов. — М.: НТФ «Энергопрогресс», «Энергетик». 2000 — 76 с.
4. Маркушин В.М. Поперечные колебания и устойчивость цилиндрических витых пружин. — Динамика и прочность пружин. Сборник статей.- Издательство АН СССР: М-Л, 1950, с 238–279.