Требования к эксплуатационным характеристикам гасителей вибрации для воздушных линий электропередачи

Б.М. Жуков, к.т.н., начальник отдела виброзащитных устройств и спиральной арматуры ООО МЗВА»

Р.С. Каверина, руководитель экспертного совета Ассоциации «Электросетьизоляция»

Одной из основных причин выхода из строя воздушных линий электропередачи является разрушение проводов, арматуры и изоляторов в результате воздействия ветровой вибрации. Для защиты линий электропередачи от воздействия вибрации принимаются различные меры: уменьшение тяжения проводов, тросов и кабелей (далее – проводов), длин пролетов, применение гасителей вибрации. Основным способом защиты проводов является установка на них гасителей вибрации. За последние сто лет (со времени первого применения резонансных гасителей вибрации Стокбриджа) было разработано большое число различных конструкций гасителей вибрации. Работы велись в направлениях повышения эффективности гашения вибрации, повышения надежности и долговечности самих гасителей. В настоящее время сформировался перечень технических требований к гасителям вибрации [1,2,3], разработаны методы испытаний [1,3,4], выпущены многочисленные научные труды, обобщенные в монографиях [4,5].

В ПО «ФОРЭНЕРГО» в течение двадцати лет ведутся работы по изучению процессов вибрации и разрабатываются методы повышения стойкости линий электропередачи к знакопеременным нагрузкам [6]. Данная работа основана на большом объеме экспериментальных данных, полученных сотрудниками ПО «ФОРЭНЕРГО» в результате проведенных испытаний.

Основной характеристикой гасителя Стокбриджа, отвечающей за его способность гасить вибрацию, является мощность поглощения энергии ветра гасителем. Максимальных значений мощность гасителя достигает на резонансных частотах. Гасители Стокбриджа имеют в рабочем диапазоне, в зависимости от конструкции, от 2 до 6 резонансных частот. На основании этого сложилось мнение о том, что эффективность гасителя определяется числом его резонансных частот. Это мнение нашло отражение в «Положении о технической политике ОАО «ФСК ЕЭС», в котором, начиная с 2007 года, рекомендуется применение многорезонансных гасителей вибрации. К данному положению выпущено разъяснение: Информационное письмо ОАО «ФСК ЕЭС» № ЧА/29/173 от 08.12.2007, в котором указывается, что применение гасителей вибрации, имеющих менее 3-х резонансных частот, запрещено. Таким образом, было фактически запрещено применение гасителей вибрации марок ГПГ, ГВН и ГПС, выпускавшихся в течение нескольких десятилетий.

Анализ отечественного и зарубежного опыта эксплуатации показал, что в ряде случаев применение гасителей, имеющих три резонансных частоты, может способствовать возникновению аварийных ситуаций на ВЛ. В работе [4] показано, что, если рассматривать резонансные частоты гасителя вибрации в порядке возрастания, то колебания груза на первых двух частотах вызывают изгиб троса гасителя, а колебания на третьей резонансной частоте вызывают кручение троса. В литературе [4] отмечено разрушение троса гасителя при крутильных колебаниях (рис. 1). Кручение троса гасителя Стокбриджа наблюдается при частоте колебаний от 30 до100 Гц, и, в зависимости от диаметра провода, это происходит при скоростях ветра 5 – 9 м/с.

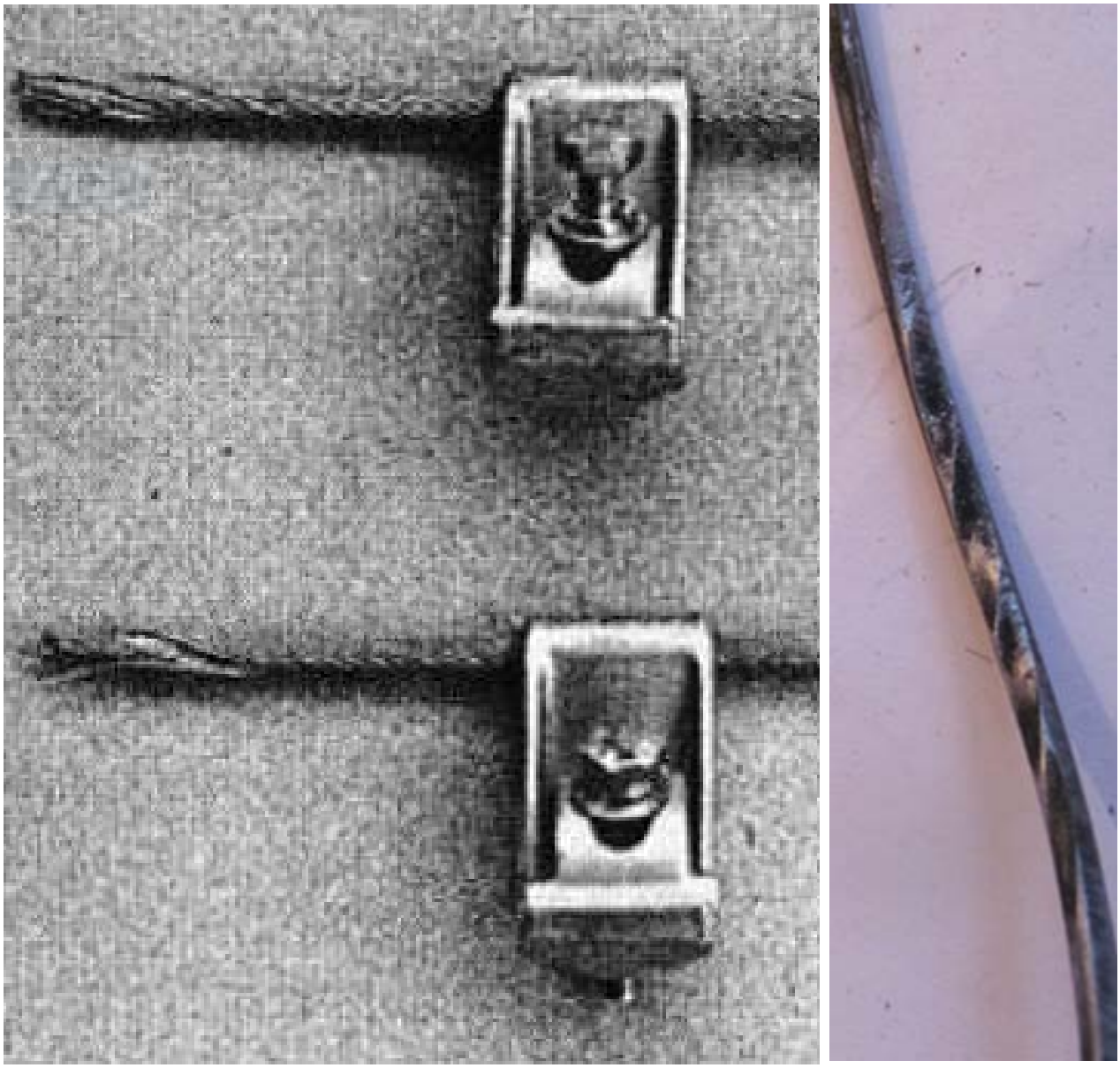

Рисунок 1. Разрушение троса гасителя вибрации [4] и фрикционный износ проволоки троса гасителя (ВЛ 110 кВ «Ванкорская ГТЭС – Мангазея»).

Аналогичные разрушения наблюдали авторы статьи у гасителей, использовавшихся в условиях Крайнего Севера (рис. 2 и 3).

Рисунок 2. Разрушение троса гасителя вибрации на ВЛ 220 кВ «Надым-Салехард» с потерей одного груза.

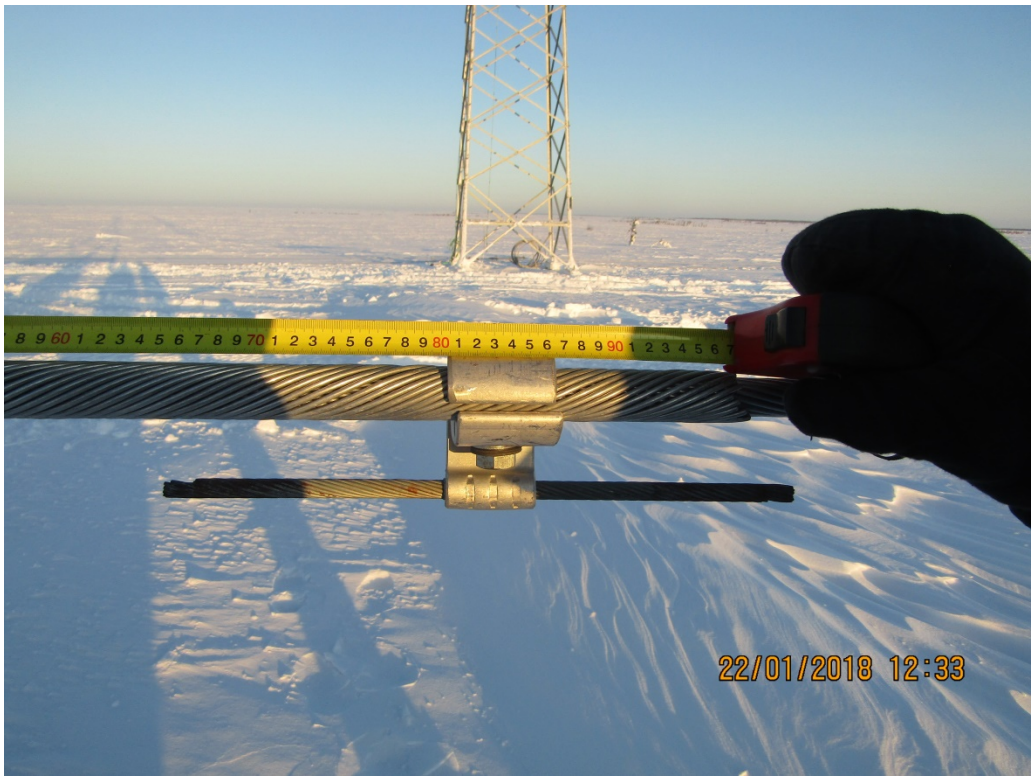

Рисунок 3. Разрушение троса гасителя вибрации на ВЛ 220 кВ «Надым-Салехард» с потерей двух грузов.

Для оценки опасности разрушения троса от крутильных колебаний грузов гасителей были проведены расчеты касательных напряжений в проволоках троса гасителя. Расчет напряжений в проволоках троса гасителя вибрации, проведенный для гасителя ГВ-1,6-11-450 производства ООО «МЗВА», имеющего несимметричные грузы, показал, что величина касательных напряжений в проволоках наружного повива троса достигает величины допускаемых напряжений при кручении (200 МПа) для нормализованной стали 65Г [7]. Расчеты проводились на основании данных, полученных при испытаниях гасителя на стенде. Зависимость расчетных касательных напряжений от частоты и скорости перемещения зажима гасителя в области третьей резонансной частоты приведены на рис. 4.

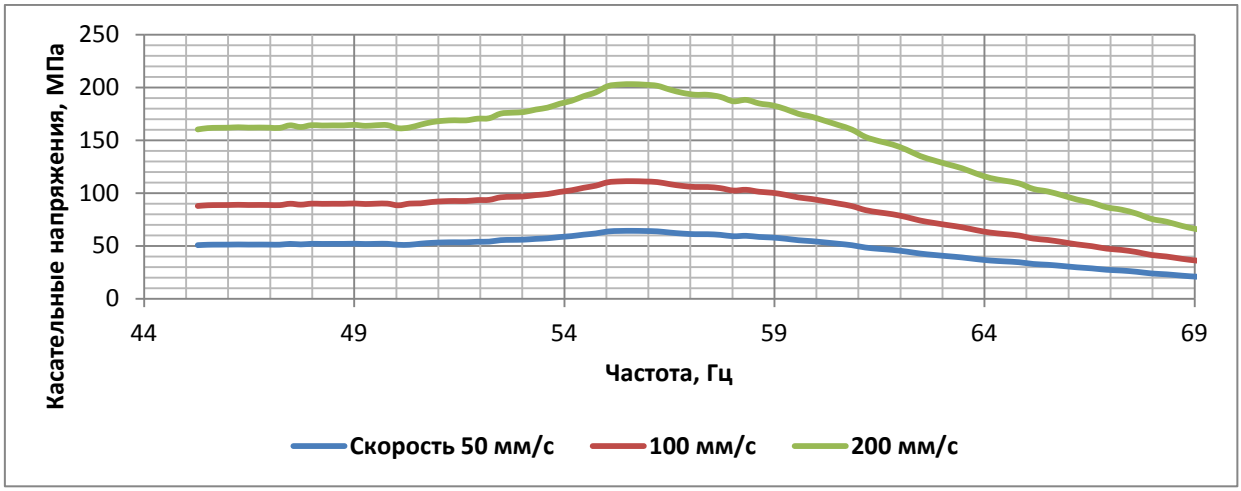

Рисунок 4. Зависимость касательных напряжений в проволоках наружного повива троса гасителя вибрации ГВ-1,6-11-450 от частоты и скорости перемещения зажима гасителя на испытательном стенде.

В данной статье авторы на основании исследований различных конструкций гасителей вибрации оценивают целесообразность запрета применения гасителей с двумя резонансными частотами и правомочность использования числа резонансных частот гасителя в качестве основного фактора, определяющего его эффективность. В статье авторы на основании оценки параметров гасителей вибрации показывают, что этот параметр нельзя оценивать только с помощью числа резонансных частот.

Испытания проводились в соответствии с приложением Д2 ГОСТ Р 51155-2017. Данное испытание используется для оценки стабильности параметров гасителей вибрации. Указания по применению гасителей вибрации, приведенные в упомянутом выше информационном письме «ФСК ЕЭС», основаны на результатах испытаний, проведенных этим методом.

ГОСТ Р 51155-2017 и МЭК 61897-2020 рекомендуют оценивать эффективность гасителя путем испытаний его совместно с проводом, однако, для оценки сравнительной эффективности различных гасителей, достаточно использование метода испытаний согласно приложению Д2 ГОСТ Р 51155-2017.

Для оценки правильности выбора в качестве критерия оценки эффективности гасителя вибрации количества резонансных частот рассмотрим несколько типов гасителей вибрации производства ООО «МЗВА»:

- гаситель ГПГ-1,6-11-450,

- гаситель ГВ-1,6-11-450,

- несимметричный гаситель марки ГВ-1,6/1,2-11-500,

- пневматический гаситель,

- спиральный гаситель.

Измерение параметров гасителя (сила, скорость, межфазовый угол) проводилось в диапазоне частот, характерном для данного гасителя с шагом 0,35 Гц. Общий вид испытательного вибростенда с гасителем ГПГ-1,6-11-450 приведен на рисунке 5.

Мощность гасителей определяли по формуле:

$$P(f) = 0{,}5 \cdot F(f) \cdot v \cdot cos\varphi(f) \qquad (1)$$

F(f) – сила, приложенная к гасителю вибрации;

v – виброскорость (в процессе испытаний поддерживается равной 0,1 м/с);

φ(f) – угол между векторами скорости и силы.

Резонансные частоты определяли по максимумам функции $P(f)$.

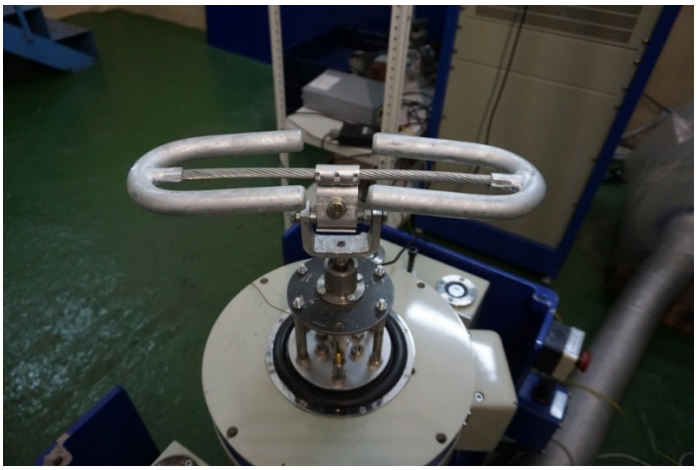

Рисунок 5. Гаситель ГПГ-1,6-11-450 на испытательном стенде.

Рисунок 6. Гаситель ГВ-1,6-11-450.

У гасителя ГПГ грузы имеют одинаковые плечи (рис. 5), у гасителя марки ГВ грузы имеют плечи разной длины (рис. 6). На рис. 7 показаны зависимости мощности гасителей ГВ-1,6-11-450 и ГПГ-1,6-11-450 от частоты. Эти гасители имеют грузы, выполненные в виде U- образных стержней круглого сечения.

На графиках отчетливо видны три резонансные частоты у гасителя ГВ-1,6-11-450 и две резонансные частоты у гасителя ГПГ-1,6-11-450. Однако, величина мощности рассеивания у обоих гасителей в среднем отличается незначительно, это можно оценить, например, сравнив средние значения мощности рассеивания обоих гасителей. Среднее значение мощности определяли по формуле:

$$P_c = \frac{\sum_{i=1}^{n} P_i}{n} \quad (2)$$

P_i – значение мощности на i частоте;

n - число измерений.

Среднее значение мощности у гасителя ГВ-1,6-11-450 составляет 2,05 Вт, а у гасителя ГПГ-1,6-11-450 соответственно - 1,95 Вт. Таким образом, в среднем, во всем диапазоне частот гасители практически равноценны по мощности рассевания энергии.

-

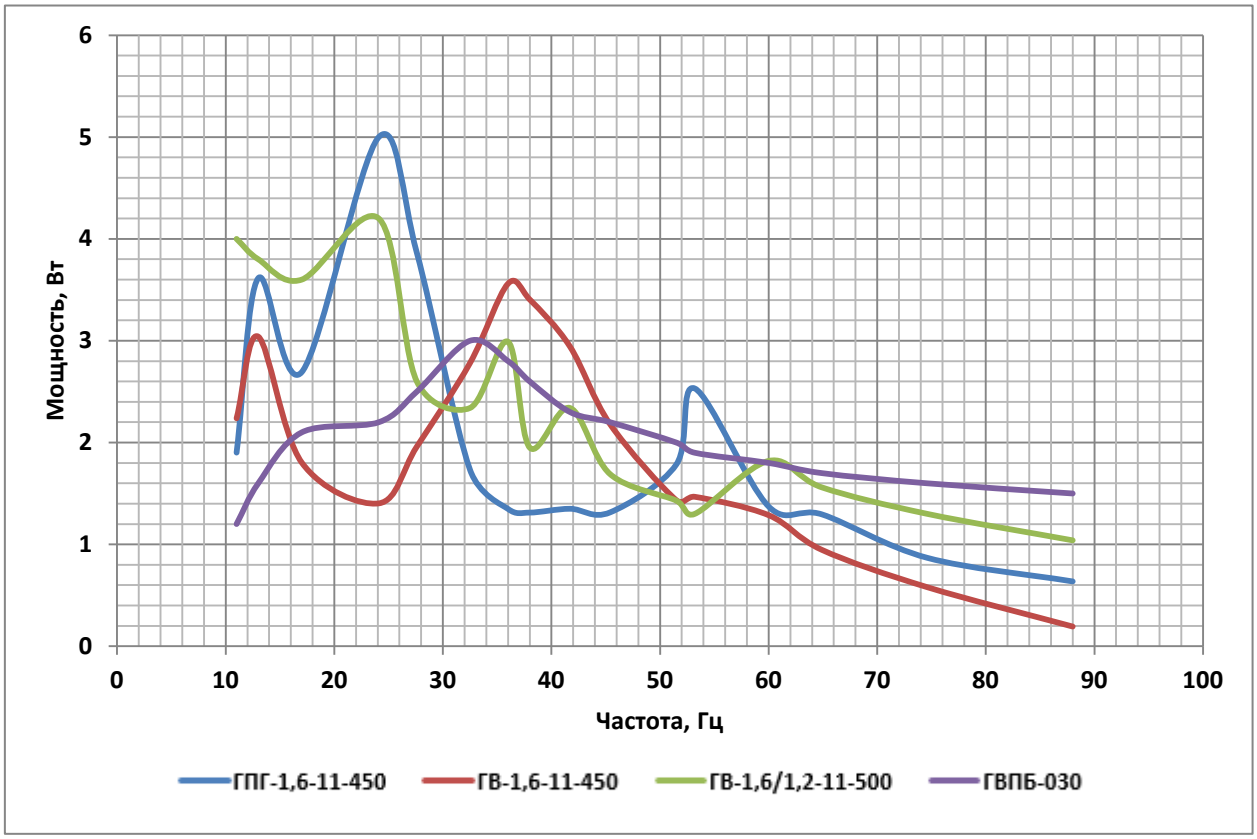

Рисунок 7. Зависимость мощности гасителей ГПГ-1,6-11-450, ГВ-1,6-11-450, ГВ-1,6/1,2-11-500, ГВПБ-030 от частоты.

Повышение эффективности частот гасителей вибрации Стокбриджа может быть достигнуто путем применения грузов различной массы, смещения центра тяжести гасителя относительно центра жесткости гасителя, при этом длина участков троса, примыкающих к грузам, будет отличаться. Теоретически такой гаситель может иметь до шести резонанс-

ных частот, которые накладываются друг на друга. У таких гасителей отсутствует снижение мощности на частотах справа и слева от резонансов (гаситель ГВ-1,6/1,2-11-500).

Максимумы мощности на графике для гасителя ГВ-1,6/1,2-11-500 следует считать условными резонансными частотами, поскольку в результате наложения резонансных частот максимум мощности может появиться на нерезонансной частоте. Среднее значение мощности гасителя ГВ-1,6/1,2-11-500 составляет 2,2 Вт.

Несколько лет назад в ПО «ФОРЭНЕРГО» разработан пневматический гаситель вибрации типа ГВПБ, основанный на новом физическом принципе работы. Гашение колебаний происходит за счет вязкого трения воздуха, перетекающего через специальные отверстия внутри оболочки, разделенной подвижной мембраной (рис. 8).

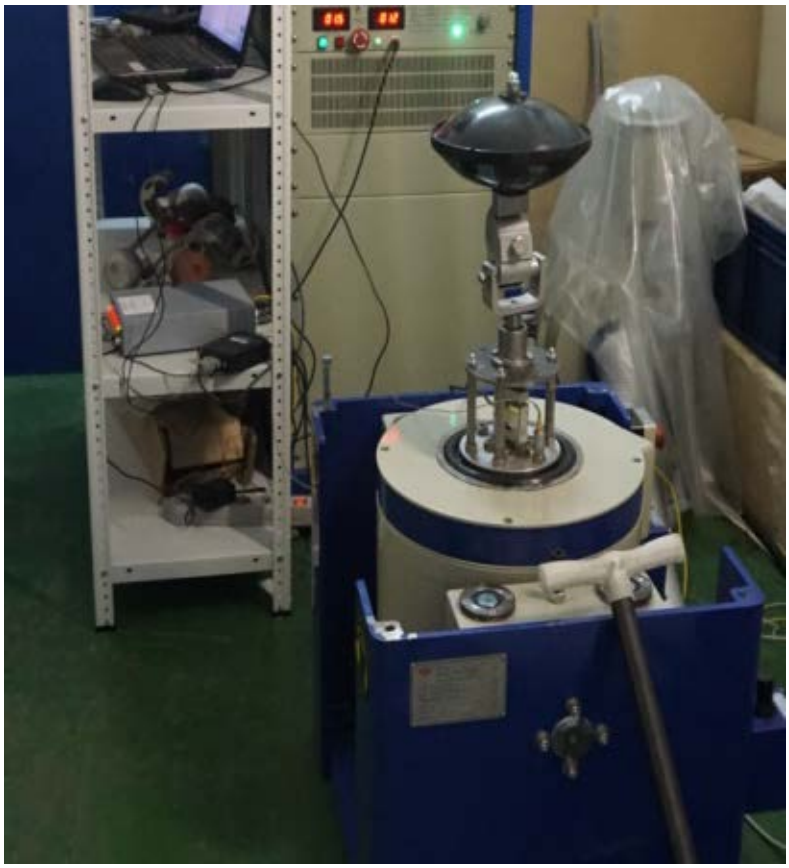

Рисунок 8. Пневматический гаситель вибрации
на испытательном стенде.

Зависимость мощности рассеивания гасителя от частоты (рис. 7) показывает отсутствие ярко выраженных резонансных частот у данной модели гасителя. Следует отметить, что данная конструкция обеспечивает надежную защиту от вибрации в широком частотном диапазоне. Среднее значение мощности пневматического гасителя составляет 2,6 Вт.

Другим «безрезонансным» типом гасителей являются спиральные гасители вибрации. Определить эффективность спирального гасителя можно методом стоячей волны совместно с проводом. Эффективность спирального гасителя вибрации ГВС-11, установленного на проводе АС 70/11, а также зависимость мощности от частоты приведены на рис. 9. Расчетная длина пролета при определении мощности ветра – 100 м.

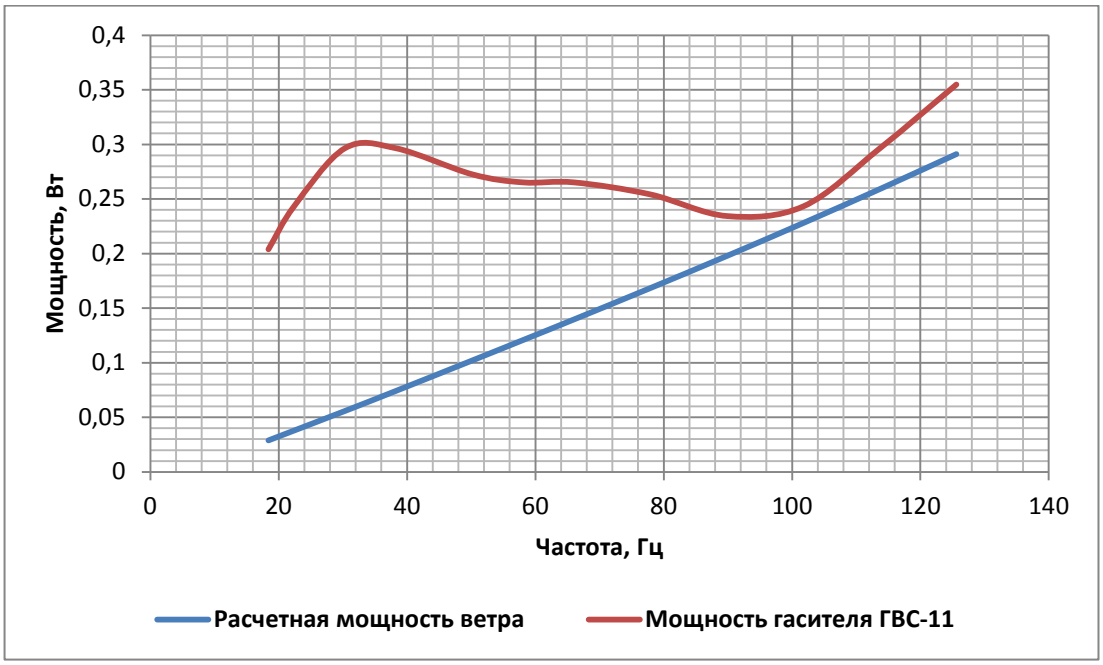

Рисунок 9. Эффективность гасителя вибрации ГВС-11 на проводе АС70/11
(зависимость мощности спирального гасителя ГВС-11 от частоты).

Задачей гасителя вибрации является снижение амплитуды колебаний провода до безопасного уровня, при котором система «провод-арматура-изоляторы» устойчива к воздействию ветровой вибрации в течение всего срока службы. Этим требованиям могут удовлетворять и гасители, имеющие две резонансные частоты, и гасители, не имеющие резонансных частот, при правильном подборе схемы защиты (правильный подбор типа гасителя, их количество и мест установки на проводе).

Переход на гасители, не имеющие резонансной частоты, нашел отражение в новой редакции МЭК 61897-2020. В частности, была принята методика испытаний гасителей вибрации на усталость. Введение в МЭК 61897-2020 нового метода испытаний гасителей вибрации на усталость, вероятно, вызовет необходимость введения изменений в ГОСТ Р 51177-2017 и ГОСТ Р 51155-2017. Кроме того, появление гасителей, не имеющих резонансных частот (спиральные, пневматические), и имеющих невыраженные резонансные частоты (гасители Стокбриджа с грузами разной массы), требует введения в упомянутые стандарты ряда уточнений в части выбора частот для проведения ресурсных испытаний.

Результаты определения характеристик гасителей показывают, что количество резонансных частот не является определяющим фактором, обеспечивающим эффективность гасителей вибрации. Определяющим фактором является правильный выбор схемы защиты проводов от вибрации. У ряда гасителей (пневматические, спиральные) резонансные частоты отсутствуют, при этом они обеспечивают высокую мощность рассеивания энергии колебаний.

Развитием системы защиты от вибрации ВЛ могла бы стать общепринятая методика, с помощью которой можно было бы разрабатывать эффективные схемы защиты от вибрации с применением различных по конструкции гасителей. Как пример, рассмотрим испытания провода АЖС70/39 с различными гасителями, которые проводились энергетическим методом согласно Приложению Д (п. Д.1.2) ГОСТ Р 51155-2017. На рис. 10 приведены графики энергопоглощения гасителями разного типа на проводе АЖС70/39. При эффективной схеме защиты от вибрации гасителями мощность гасителей должна превышать мощность ветра. Из графиков видно, что только схема с двумя гасителями ГВ-1,2/0,8-11-400 обеспечивает полную защиту провода АЖС 70/39 во всех диапазонах частот.

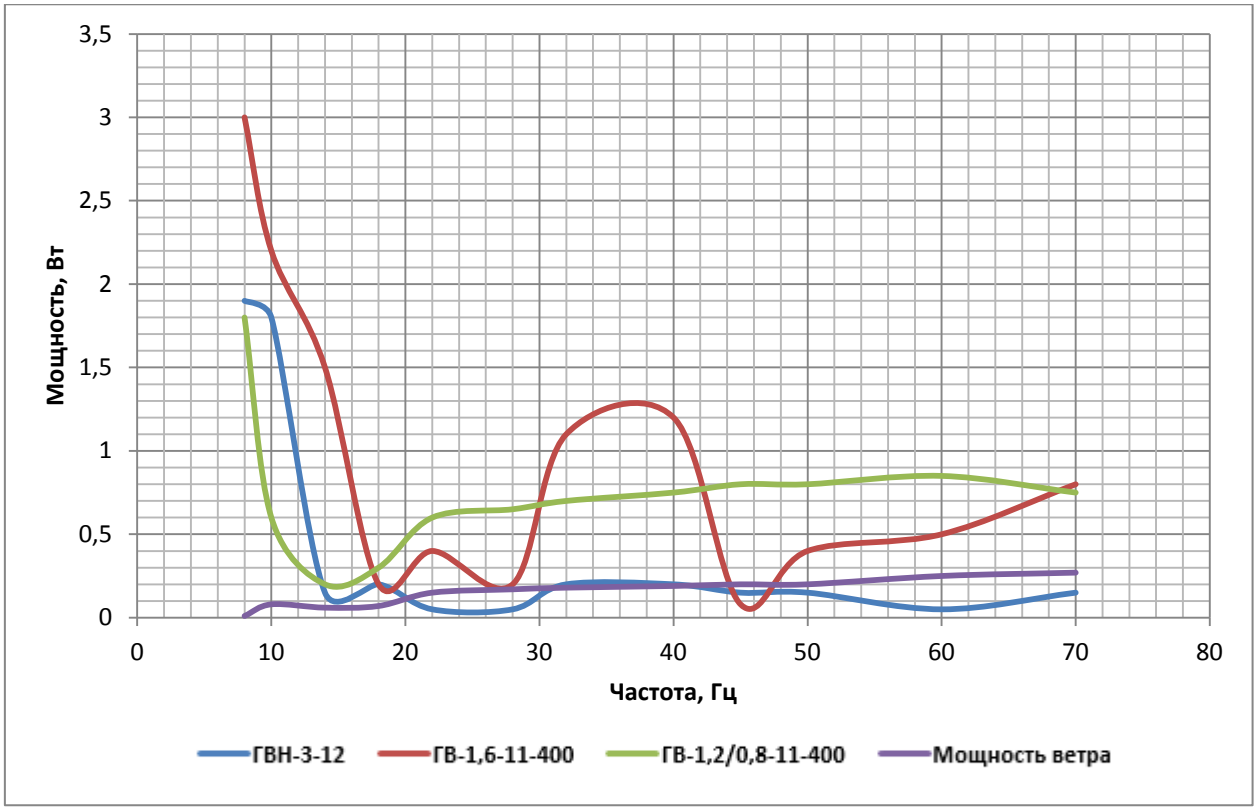

Рисунок 10. Эффективность гашения вибрации провода АЖС70/39 гасителем типа ГВН-3-12, ГВ-1,6-11-400, ГВ-1,2/0,8-11-400 (два гасителя).

Разработка типовой методики защиты проводов от вибрации на основании различных расчетных моделей, результатов применения различных схем гашения на реальных ВЛ и экспериментальных данных позволит существенно повысить надежность ВЛ.

Выводы.

1. Следует отказаться от принятия решения об эффективности гасителей вибрации на основании оценки по числу имеющихся резонансных частот. Из «Положения о технической политике ОАО «ФСК ЕЭС» следует исключить требование о приме-

нении только многорезонансных гасителей вибрации, отменить Информационное письмо ОАО «ФСК ЕЭС» № ЧА/29/173 от 08.12.2007.

2. Оценку эффективности гасителей следует проводить согласно требованиям ГОСТ Р 51177-2017 по методам, изложенным в ГОСТ Р 51155-2017 и МЭК 61897-2020.
3. Следует разработать соответствующее изменение ГОСТ Р 51177-2017 и ГОСТ Р 51155-2017, внеся новые требования и методы испытаний согласно МЭК 61897-2020, а также учесть особенности новых конструкций гасителей вибрации (например, пневматических).
4. Следует разработать методику по применению гасителей вибрации с учетом особенностей различных по конструкции гасителей.

Литература.

1. ГОСТ Р 51177-2017 «Арматура линейная. Технические требования».
2. ГОСТ Р 51155-2017 «Арматура линейная. Правила приемки и методы испытаний».
3. МЭК 61897-2020 «Воздушные линии – Требования и процедуры испытаний для гасителей ветровой вибрации».
4. EPRI Transmission Line Reference Book -Wind Induced Conductor Motion, Second Edition.
5. CIGRE Green Books. Overhead Lines. CIGRE, International Council on Large Electric Systems (CIGRE), Paris, France.
6. Жуков Б.М. Гашение вибрации – важная проблема повышения надежности и долговечности линий электропередачи и связи. - Воздушные линии, 2013, № 4, с.16-23.
7. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: В 3 т. Т.1- 8-е изд. перераб. и доп. Под ред. И.Н. Жестковой. - М.: Машиностроение, 2001.- 920 с.