

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГАСИТЕЛЕЙ ВИБРАЦИИ ТИПА ГВТ

АВТОР:

С.В. ТРОФИМОВ,
К.Т.Н.,
АО «НТЦ ФСК ЕЭС»

Все провода воздушных линий электропередачи в той или иной степени подвержены колебаниям, вызываемым действием ветра. Наиболее распространенными видами таких колебаний являются вибрация

и колебания проводов расщепленных фаз (вызываемые действием аэродинамического следа). Оба названных вида колебаний могут быть причиной повреждений проводов, линейной арматуры, систем подвески проводов.

Ключевые слова: вибрация; гаситель вибрации; провод; эффективность работы гасителя вибрации на проводе.



Общий вид гасителя вибрации ГВМ(У)-1,6/2,4-16/20 на испытательной установке в АО «НТЦ ФСК ЕЭС»

ВВЕДЕНИЕ

Практически все воздушные линии электропередачи (ВЛ) в той или иной степени подвержены вибрации проводов, вызываемой действием ветра. Следствием этого могут стать усталостные повреждения проволок как наружных, так и внутренних повивов проводов. Наиболее вероятными местами расположения зон опасных усталостных повреждений являются места входа проводов в поддерживающие зажимы и в зажимы крепления на проводах гасителей вибрации и пляски.

Для защиты провода от усталостных повреждений, возникающих в местах его выхода из поддерживающих зажимов, в соответствии с ПУЭ-7 (раздел 2, гл. 2.5, п. 2.5.85), широко применяются гасители вибрации Стокбриджа.

НОРМАТИВНАЯ БАЗА ДЛЯ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО ГАСИТЕЛЯ ВИБРАЦИИ ДЛЯ ПРОВОДОВ ВЛ

Наличие широкого выбора типов ГВ, каждый из которых имеет свои особенности, ставит перед проектировщиками и службами эксплуатации ВЛ проблему выбора наиболее эффективного ГВ для защиты от вибрации проводов этой ВЛ.

ПУЭ-7 определяют вибрацию проводов (тросов) как «периодические колебания провода (троса) в пролете с частотой от 3 до 150 Гц, происходящие в вертикальной плоскости при ветре и образующие стоячие волны с размахом (двойной амплитудой), который может превышать диаметр провода (троса)» (раздел 2,

гл. 2.5, п. 2.5.3). ПУЭ-7 не дают рекомендаций, в каком частотном диапазоне необходимо защищать от вибрации конкретный провод и как выбрать для него оптимальный по эффективности работы на проводе ГВ.

Подробный алгоритм выбора оптимального ГВ для провода и места размещения ГВ на проводе в соответствии с типом местности, длиной пролета, маркой провода, конструкцией фазы и тяжением в проводе подробно изложен в РД 34.20.189-90 «Методические указания по типовой защите от вибрации...» [2]. Однако за 20 лет, прошедших с момента их вступления в силу, а также в результате проведения исследований, посвященных вибрации проводов, появилась необходимость уточнить некоторые положения этих методических указаний.

До 2017 г. не существовало нормативной основы, согласно которой можно было бы сравнивать показатели эффективности работы ГВ на проводе и выбирать оптимальный вариант защиты от вибрации. Не был определен метод, позволяющий определить эффективность работы ГВ на проводе.

Международный стандарт МЭК № 61897:1998 рекомендует проводить определенный ряд испытаний для качественной проверки готовности ГВ к надежной работе на проводе ВЛ, в том числе испытания по проверке частотно-энергетических характеристик ГВ и оценки эффективности работы ГВ на проводе [3].

В 2017 г. были утверждены ГОСТ Р 51155-2017 «Арматура линейная. Правила приемки и методы испытаний» [4], вводимый в действие с 01.01.2018 г., и ГОСТ Р 51177-2017 «Арматура линейная. Общие технические условия» [5], вводимый в действие с 01.07.2018 г., в которых

были полностью учтены рекомендации Международного стандарта МЭК 61897:1998.

ГОСТ Р 51177-2017 устанавливает основное требование к ГВ: «гасители вибрации должны обеспечивать снижение мощности колебаний провода (троса) до безопасного уровня и должны максимально снижать величину изгибных напряжений в проволочках провода в пролете, в том числе на выходе из поддерживающего, натяжного зажимов и зажима гасителя вибрации при колебаниях системы «провод — гаситель вибрации» на собственных частотах, входящих в диапазон частот колебаний, в котором проводу (тросу) требуется защита от вибрации до безопасных уровней» [5].

ГОСТ Р 51155-2017 «Арматура линейная. Правила приемки и методы испытаний» предлагает для определения эффективности работы ГВ ряд видов испытаний, включенных в перечень типовых и приемочных испытаний защитной арматуры:

- испытание по определению эффективности ГВ по мощности рассеяния;
- испытание по определению эффективности работы ГВ в системе «провод — гаситель вибрации» по величине максимальных циклических изгибных напряжений [4].

Испытание по определению эффективности работы ГВ на проводе по мощности рассеяния энергии колебаний провода не в полной мере характеризует полезность применения того или иного типа ГВ. Это испытание не дает ответа на главный вопрос: снижает ли ГВ величины максимальных изгибных напряжений в опасных сечениях провода на всех собственных частотах колебаний в виброопасном диапазоне частот, где проводу требуется защита от вибрации?

Полную информацию по полезности применения конкретного гасителя вибрации для защиты конкретного провода может дать только его коэффициент эффективности работы на этом проводе, полученный при испытаниях по определению эффективности работы ГВ в системе «провод — гаситель вибрации» по величине максимальных циклических изгибных напряжений.

Ниже рассматривается возможность использования результатов испытаний по определению коэффициентов эффективности работы ГВ ГПГ-1,6-11-450, ГВУ(М)-1,6/2,4-16/20 и ГВТ-1,6-11-600 на проводе АС 150/24 для определения параметров оптимального ГВ для этого провода.

Провод АС 150/24, имеющий диаметр 17,1 мм [5], необходимо защищать в диапазоне величин поперечной составляющей скорости ветра от 0,6 до 7,0 м/с согласно рекомендациям, изложенным в Методических указаниях по типовой защите от вибрации... [2]. Именно в этом диапазоне скоростей поперечной составляющей ветра за проводом в устойчивом режиме периодически возникают и срываются воздушные

вихри. Частота образования вихрей для практического использования определяется формулой:

$$n = 200 v/d,$$

где n — частота образования воздушных вихрей, Гц; v — скорость ветра, м/с; d — диаметр провода, мм.

Важным представляется то, что каждые два следующих друг за другом импульса периодической вертикальной нагрузки на проводе составляют во времени полный период временной периодической зависимости, период которой равен сумме периодов двух последовательных вихрей, а частота периодической вертикальной нагрузки на проводе от воздушного потока определяется по формуле:

$$f = n/2 = 100 v/d,$$

где f — частота периодической вертикальной нагрузки на проводе, Гц.

Таким образом, провод АС 150/24 нуждается в защите от вибрации на частотах, лежащих в диапазоне от 3,51 до 40,94 Гц [6], который будем ниже называть виброопасным для АС 150/24.

Утвержденный и вводимый в действие с 1 января 2018 г. стандарт ГОСТ Р 51177-2017 «Арматура линейная. Правила приемки и методы испытаний» вводит «коэффициент эффективности работы ГВ на проводе» с соответствующим определением, упрощающий выбор оптимального ГВ для конкретного провода.

Коэффициент эффективности работы ГВ на проводе $k_{эф}(\dot{\omega}_{при})$ определяется на каждой собственной частоте системы «провод — ГВ» $\dot{\omega}_{при}$ по формуле:

$$k_{эф}(\dot{\omega}_{при}) = \sigma_{мин}(\dot{\omega}_{при})/\sigma_{макс}(\dot{\omega}_{при}),$$

где $\sigma_{макс}(\dot{\omega}_{при})$ — максимальные изгибные напряжения в самом опасном сечении провода при колебаниях системы с частотой $\dot{\omega}_{при}$, равной величине i -й собственной частоты системы «провод — ГВ»; $\sigma_{мин}(\dot{\omega}_{при})$ — максимальные изгибные напряжения в самом опасном сечении провода без ГВ при колебаниях с частотой $\dot{\omega}_{при}$, равной величине j -й собственной частоты колебаний провода без ГВ, ближайшей по величине к частоте $\dot{\omega}_{при}$.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ПО ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ГВ НА ПРОВОДЕ И МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ

В АО «НТЦ ФСК ЕЭС» впервые в РФ создана лаборатория по испытанию ВГ в соответствии с ГОСТ Р 51155-2017. На рис. 1 и рис. 2 показана установка, разработанная в соответствии с рекомендациями

Международного стандарта МЭК № 61897:1998, на которой в АО «НТЦ ФСК ЕЭС» проводятся испытания для оценки эффективности работы ГВ на проводе АС 150/24.

Описание установки для испытаний по оценке эффективности работы ГВ на проводе и методика испытаний подробно изложены автором в статье «Определение границ основного и расширенного диапазонов частот...» [7].

Основные параметры установки и элементы измерительно-регистрающего комплекса установки для испытаний по оценке эффективности работы ГВ на проводе полностью соответствуют рекомендациям стандарта МЭК 61897:1998 [3].

Коэффициент эффективности работы конкретного ГВ определяется путем испытаний на опытном пролете с проводом, для защиты которого предназначена данная марка гасителя. Всего должно выполняться 15–20 испытаний на собственных частотах системы «провод — ГВ», входящих в виброопасный для провода частотный диапазон.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ГАСИТЕЛЕЙ ВИБРАЦИИ ГПГ-1,6-11-450, ГВУ(М)-1,6/2,4-16/20 И ГВТ-1,6-11-600

В результате экспериментальных исследований в АО «НТЦ ФСК

ЕЭС» были получены коэффициенты эффективности работы ГВ ГПГ-1,5-11-450, ГВУ(М)-1,6/2,4-16/20 и ГВТ-1,6-11-600 (рис. 3).

ГВ ГПГ-1,6-11-450 имеет одинаковые по массе осесимметричные грузы и одинаковые по длине рабочие части упругого элемента. В виброопасный для провода АС 150/24 диапазон частот попадают две пары собственных частот ГВ, расположенных в диапазонах 7–9 Гц и 37–41 Гц.

Анализ графика коэффициента эффективности работы ГВ ГПГ-1,6-11-450 K_1 показывает, что ГВ защищает провод от вибрации в диапазонах частот 9,4–19,5 Гц и 26–41 Гц, что составляет 66,9 % от величины виброопасного для провода АС 150/24 частотного диапазона.

В области существования первых двух собственных частот ГВ ГПГ-1,6-450 (7–9 Гц) $K_1 = 4,08$, т.е. ГВ практически переламывает провод, при этом максимальные изгибные напряжения превосходят аналогичные напряжения в проводе без ГВ более чем в четыре раза.

В области существования пары вторых собственных частот ГВ ГПГ-1,6-450 (37–41 Гц) также наблюдается некоторое ухудшение эффективности работы ГВ, однако на этих частотах $K_1 < 0,8$, т.е. максимальные значения изгибных напряжений на 20 % меньше, чем в проводе без ГВ.

В зоне частот 22–25 Гц $1,0 < K_1 < 1,5$, т.е. максимальные величины изгибных напряжений в проводе с ГВ ГВТ-1,6-11-450 также на 50 % превышают значения величин изгибных напряжений в проводе без ГВ.

ГВ ГВУ(М)-1,6/2,4-16/20 имеет неодинаковые по массе не осесимметричные грузы со смещенным

ИЗ «МЕТОДИЧЕСКИХ УКАЗАНИЙ ПО ТИПОВОЙ ЗАЩИТЕ ОТ ВИБРАЦИИ ПРОВОДОВ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НАПРЯЖЕНИЕМ 35–750 КВ» (РД 34.20.182-90)

2.1. Причины возникновения, характеристики вибрации

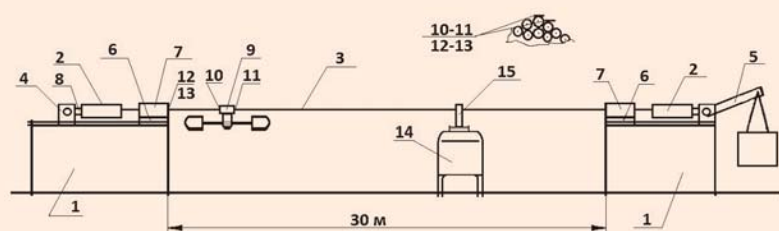
2.1.1. Золовой вибрацией или просто вибрацией проводов называются вызываемые ветром периодические колебания натянутого в пролете ВЛ провода, происходящие главным образом в вертикальной плоскости и образующие на длине пролета L стоячие волны...

2.1.2. Измерения и расчеты показывают, что для вибрации проводов характерными являются диапазон частот колебаний от 3 до 150 Гц, длины полуволн колебаний (расстояние между двумя соседними узлами) от 1 до 30 м, размах (удвоенная амплитуда) колебаний 2А в пучности может несколько превышать по значению диаметр провода.

[...]

2.1.4. Вибрация является результатом воздействия на провод поперечно направленного аэродинамического потока со скоростью от 0,6 до 7 м/с, создающего за проводом периодически возникающие и срываются вихревые движения воздуха. Возникающие за проводом вихри уносятся воздушными потоками, способствуя образованию следующих вихрей с противоположным направлением вращения.

СХЕМА УСТАНОВКИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ГВ



1 — опоры пролета; 2 — натяжные зажимы; 3 — образец провода; 4 — неподвижная опора; 5 — подвижная опора; 6 — специальные приспособления для закрепления имитаторов поддерживающих зажимов; 7 — имитаторы поддерживающих зажимов; 8 — датчик усилий в проводе; 9 — ГВ; 10, 11, 12 и 13 — группы тензодатчиков; 14 — вибростенд ВСВ-202-150; 15 — специальный толкатель для возбуждения провода

УСТАНОВКА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ ГВ НА ПРОВОДЕ В АО «НТЦ ФСК ЕЭС»



Рис. 2

относительно продольной оси упругого элемента и неодинаковые по длине рабочие части упругого элемента. В виброопасный для провода АС 150/24 частотный диапазон попадают три пары собственных частот, расположенных в диапазонах 8–9 Гц, 17–19 Гц и 29–32 Гц.

Анализ графика коэффициента эффективности работы ГВ ГВУ(М)-1,6/2,4-16/20 K_2 показывает, что ГВ не защищает провод от вибрации в диапазонах частот 3,51–10,0 Гц, 14–16 Гц и 23–37 Гц. Таким образом, ГВ ГВУ(М)-1,6/2,4-16/20 защищает провод АС 150/24 в диапазонах частот, составляющих 57,25 % от величины виброопасного для провода АС 150/24 частотного диапазона.

В области существования первых двух собственных частот ГВ ГВУ(М)-1,6/2,4-16/20 (7–9 Гц) явного максимума коэффициента K_2 не зафиксировано, при этом максимальное $K_2=1,48$ зафиксировано при частоте 5,80 Гц, где максимальные изгибные напряжения в 1,48 раз превосходят аналогичные напряжения в проводе без ГВ.

В области существования пары вторых собственных частот ГВ ГВУ(М)-1,6/2,4-16/20 (17–19 Гц) также наблюдается некоторое ухудшение эффективности работы ГВ, однако на этих частотах $K_2=1,08$, т.е. максимальные значения изгибных напряжений на 8 % меньше, чем в проводе без ГВ.

В зоне существования третьей пары частот 29–32 Гц коэффициент

эффективности работы K_2 расположен в диапазоне $1,0 < K_2 < 1,5$, т.е. максимальные величины изгибных напряжений в проводе с ГВ ГВУ(М)-1,6/2,4-16/20 также превышают значения величин изгибных напряжений в проводе без ГВ.

Анализ результатов испытаний на эффективность работы на проводе АС 150/24 ГВ ГПГ-1,6-11-450 и ГВУ(М)-1,6/2,4-16/20 показывает, что оба ГВ защищают провод в диапазонах частот, составляющих 66,9 % и 57,25 % от величины виброопасного для провода АС 150/24 диапазона частот. ГВ ГПГ-1,6-11-450 защищает провод АС 150/24 в диапазоне частот, который в 1,16 раз больше диапазона частот, в котором защищает провод ГВ ГВУ(М)-1,6/2,4-16/20. Однако ГВ ГПГ-1,6-11-450 имеет в области своих собственных частот ярко выраженный максимум коэффициента $K_1=4,08$, который в 2,7 раза превышает максимальное значение $K_2=1,5$ в области собственных частот ГВУ(М)-1,6/2,4-16/20.

Анализ результатов испытаний на эффективность работы на проводе АС 150/24 ГВ ГПГ-1,6-11-450 и ГВ ГВУ(М)-1,6/2,4-16/20 показал, что основной отрицательной особенностью этих ГВ является присутствие в виброопасном для АС 150/24 диапазоне частот собственных частот ГВ.

Повышение эффективности работы ГВ на проводе возможно путем вывода собственных частот ГВ из диапазона частот, где проводу требуется защита от вибрации. С помощью подбора формы грузов и длин рабочей части упругого элемента возможны перемещения первой пары собственных частот в зону частот меньше, чем нижняя граница виброопасного для провода АС 150/24 диапазона частот, а второй пары собственных частот — в зону частот больших, чем верхняя граница этого диапазона.

КОЭФФИЦИЕНТЫ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ГВ ГПГ-1,5-11-450, ГВУ(М)-1,6/2,4-16/20 И ГВТ-1,6-11-600

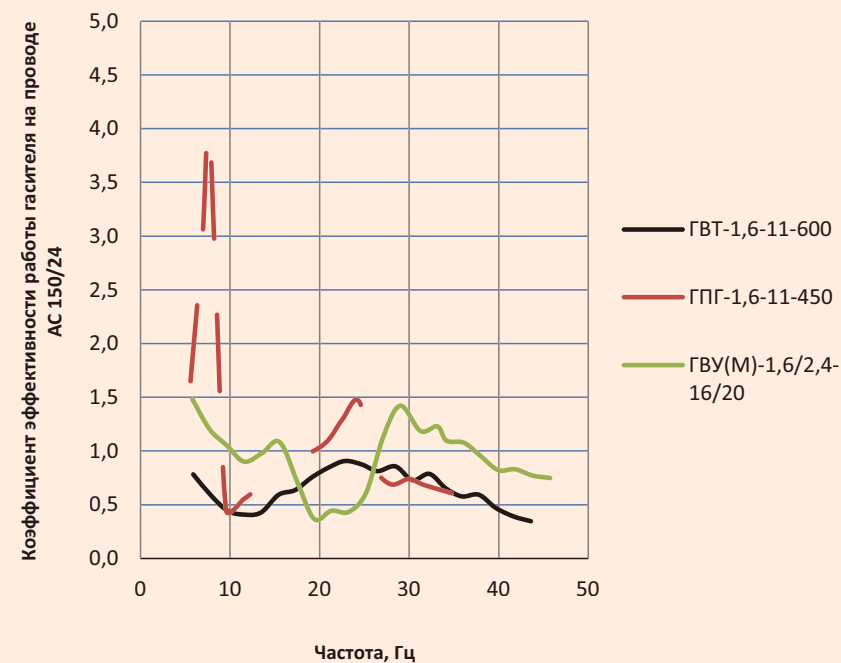


Рис. 3

Этот принцип заложен в основу конструкции ГВ ГВТ-1,6-11-600. Конструкция ГВ ГВТ разработана в АО «НТЦ ФСК ЕЭС» и защищена патентом РФ № 2 484 568 [9]. Опытные образцы ГВ ГВТ-1,6-11-600 были изготовлены ОАО «ЮАИЗ», входящим в состав холдинга Global Insulator Group. Анализ графика коэффициента эффективности работы ГВ ГВТ-1,6-11-600 КЗ показывает, что ГВ защищает провод от вибрации в диапазонах частот 5,9–43,59 Гц, т.е. ГВ ГВТ-1,6-11-600 защищает провод АС 150/24 в диапазонах частот, составляющих 93,6 % от величины виброопасного для АС 150/24 диапазона частот. Более того, на частотах 4,1–5,9 Гц,

на которых не удалось выполнить измерение коэффициента K_3 , его расчетные значения также меньше единицы.

Сравнение графиков эффективности работы на проводах АС 150/24 ГВ ГПГ-1,5-11-450, ГВУ(М)-1,6/2,4-16/20 и ГВТ-1,6-11-600 показывает, что для защиты провода АС 150/24 лучше всего подходит ГВ ГВТ-1,6-11-600.

ВЫВОДЫ

1. Коэффициент эффективности работы на проводе ГВ является своеобразным паспортом гаси-

теля вибрации, включающим в себя необходимую информацию при проектировании или эксплуатации ВЛ.

2. Повышение эффективности работы ГВ на проводе возможно путем вывода собственных частот ГВ из виброопасного диапазона частот, где проводу требуется защита от вибрации.
3. Эффективность работы гасителя вибрации типа ГВТ выше, чем у гасителей вибрации ГПГ и ГВУ(М). ГВ ГВТ-1,6-11-600 защищает провод АС 150/24 в диапазонах частот, составляющих 93,6 % от величины виброопасного для провода АС 150/24 диапазона частот.

ЛИТЕРАТУРА

1. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). Изд. 7-е. М.: НТЦ «ЭНАС», 2003.
2. Методические указания по типовой защите от вибрации и субколебаний проводов и грозозащитных тросов воздушных линий электропередачи напряжением 35–750 кВ. РД 34.20.189-90. СПО ОРГРЭС. М., 1991.
3. Стандарт МЭК 61897:1998. Воздушные линии. Требования к гасителям золотой вибрации Стокбриджа и их испытания.
4. ГОСТ Р 51155-2017. Арматура линейная. Правила приемки и методы испытаний.
5. ГОСТ Р 51177-2017. Арматура линейная. Общие технические условия.
6. ГОСТ 839-80. Провода неизолированные для воздушных линий электропередачи. Технические условия.
7. Трофимов С.В. Определение границ основного и расширенного диапазонов частот вертикальной составляющей периодической нагрузки на проводе // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2014. № 2. С. 23–27.
8. Трофимов С.В. Результаты экспериментальной проверки эффективности работы гасителя вибрации ГПГ-1,6-11-450 на проводе АС 150/24 // Электричество. 2013. № 11. С. 14–18.
9. Трофимов С.В. Патент России № 2 484 568 «Гаситель вибрации проводов». Опубл. 10.06.2011. Бюллетень № 16.