

Результаты экспериментальной проверки эффективности работы гасителей вибрации

ТРОФИМОВ С.В.

Испытание по определению эффективности работы гасителей вибрации 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 максимальные изгибные напряжения в опасных сечениях провода на всех собственных частотах колебаний в виброопасном диапазоне частоты, 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 значению максимальных циклических изгибных напряжений. 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.

К л ю ч е в ы е с л о в а: *провод, вибрация, гаситель вибрации, эффективность работы гасителя*

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 [1] широко применяются гасители вибрации типа Стокбриджа.

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

Вибрация проводов (тросов) в [1] определяется как «периодические колебания провода (троса) в полете 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)». В ПУЭ-7 нет рекомендаций, в каком частот-

ном 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 [2]. Однако за 20 лет, прошедших с момента вступления в силу этого документа, а также развития исследований, посвященных вибрации проводов, появилась необходимость уточнить некоторые положения этого РД.

Международный стандарт [3] 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. Стандарт [4] предлагает для определения эффективности работы ГВ ряд видов испытаний, включенных в перечень типовых и приемочных испытаний защитной арматуры, испытания по определению эффективности: гасителей вибрации по мощности рассеяния; при работе ГВ в системе «провод-гаситель вибрации» по значению максимальных циклических изгибных напряжений.

Испытание по определению эффективности работы ГВ на проводе по мощности рассеяния энер-

гии 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 значения максимальных изгибных напряжений в опасных сечениях провода на всех собственных частотах колебаний в виброопасном диапазоне частот, где для провода необходима 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 значению максимальных циклических изгибных напряжений.

Далее 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 значений поперечной составляющей скорости ветра от 0,6 до 7,0 м/с согласно рекомендациям [2]. Именно в этом диапазоне скоростей поперечной составляющей ветра за проводом в устойчивом режиме периодически возникают и срываются воздушные вихри. Частота образования вихрей (n) для практического использования определяется (в Гц) как $n = 200v/d$ (v – скорость ветра, м/с; d – диаметр провода, мм).

Важно 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

$$f = n/2 = 100v/d \text{ Гц.}$$

Таким образом, провод АС 150/24 нуждается в защите от вибрации на частоте лежащей в диапазоне от 3,51 до 40,94 Гц [5], который далее называется виброопасным для АС 150/24.

Утвержденный и вводимый в действие с 1 января 2018 г. стандарт [4] вводит термин «коэффициент эффективности работы ГВ на проводе» с соответствующим определением, упрощающий выбор оптимального ГВ для конкретного провода.

Коэффициент эффективности работы ГВ на проводе $k_{\text{ЭГ}}(\omega_{\text{п.ги}})$ определяется на каждой собст-

венной частоте системы «провод-ГВ» $\omega_{\text{п.ги}}$ по формуле

$$k_{\text{ЭГ}}(\omega_{\text{п.ги}}) = \sigma_{\text{м.п.г}}(\omega_{\text{п.ги}}) / \sigma_{\text{м.п}}(\omega_{\text{п.г}}),$$

где $\sigma_{\text{м.п.г}}(\omega_{\text{п.ги}})$ – максимальные изгибные напряжения в самом опасном сечении провода при колебаниях системы с частотой $\omega_{\text{п.ги}}$, равной значению i -й собственной частоты системы «провод-ГВ»; $\sigma_{\text{м.п}}(\omega_{\text{п.г}})$ – то же без ГВ при колебаниях с частотой $\omega_{\text{п.г}}$, равной j -й значению собственной частоты колебаний провода без ГВ, ближайшему значению частоты $\omega_{\text{п.г}}$.

Испытания по оценке эффективности работы ГВ на проводе АС 150/24 проводились на установке для испытаний по оценке эффективности работы гасителей в ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС». Описание установки для испытаний по оценке эффективности работы ГВ на проводе и методика испытаний подробно изложены в [6]. Основные параметры установки и элементы измерительно-регистрирующего комплекса установки для испытаний по оценке эффективности работы ГВ на проводе полностью соответствуют рекомендациям [3].

Коэффициент эффективности работы конкретного ГВ определяется при испытаниях на опытном пролете с проводом, для защиты которого предназначена данная марка гасителя.

Должно выполняться 15–20 испытаний на собственных частотах системы «провод-ГВ», входящих в виброопасный для провода частотный диапазон.

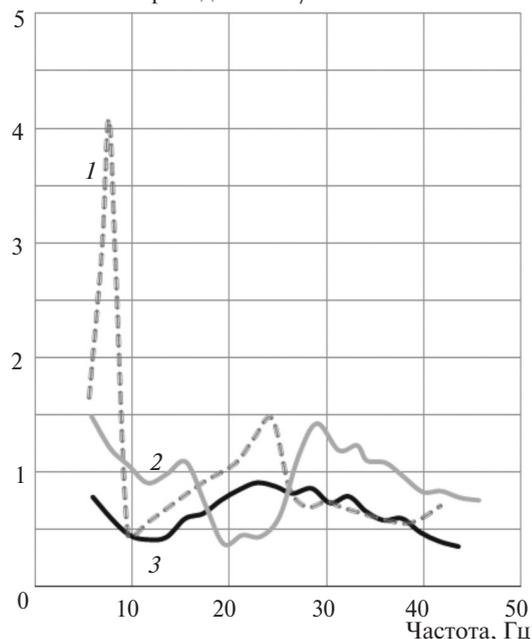
В результате экспериментальных исследований были получены коэффициенты эффективности работы ГВ ГПГ-1,5-11-450, ГВУ(М)-1,6/2,4-16/20 и ГВТ-1,6-11-600 (см. рисунок).

Гаситель вибрации 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 и 37–41 Гц. Анализ графика коэффициента эффективности работы ГВ K_1 показывает, что ГВ защищает провод от вибрации в диапазонах частоты 9,4–19,5 и 26–41 Гц, что составляет 66,9% размера 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 4 раза.

В области существования пары вторых собственных частот ГВ ГПГ-1,6-450 (37–41 Гц) также

Коэффициент эффективности работы гасителя на проводе АС150/24



Коэффициенты эффективности работы ГВ: 1 — ГПГ-1,6-11-450; 2 — ГВУ(М)-1,6/2,4-16/20; 3 — ГВТ-1,6-11-600

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 значения изгибных напряжений в проводе с ГВ ГВТ-1,6-11-450 также на 50% превышают значения изгибных напряжений в проводе без ГВ.

ГВ ГВУ(М)-1,6/2,4-16/20 имеет неодинаковые по массе неосесимметричные грузы со смещенным относительно продольной оси упругого элемента центром масс и неодинаковые по длине рабочие части упругого элемента. В виброопасный для провода АС 150/24 частотный диапазон области частот попадают три пары собственных частот, расположенных в диапазонах 8–9, 17–19 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 частоты 3,51–10,0, 14–16 и 23–37 Гц. Таким образом, ГВ ГВУ(М)-1,6/2,4-16/20 защищает провод АС 150/24 в диапазонах частоты, составляющих 57,25% 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 значение $K_2 = 1,48$ зафиксировано при частоте 5,80 Гц, где максимальные изгибные напряжения в 1,48 раза 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% больше, чем в проводе без ГВ.

В зоне существования третьей пары частот 29–32 Гц коэффициент эффективности работы K_2 находится в диапазоне $1,0 < K_2 < 1,5$, т.е. максимальные значения изгибных напряжений в проводе с ГВ ГВУ(М)-1,6/2,4-16/20 также превышают значения изгибных напряжений в проводе без ГВ.

Анализ результатов испытаний на эффективность работы ГВ ГПГ-1,6-11-450 и ГВУ(М)-1,6/2,4-16/20 показывает, что оба гасителя вибрации защищают провод в диапазонах частот, составляющих 66,9 и 57,25% значения виброопасного для провода АС 150/24 диапазона частот. Гаситель вибрации 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 рассмотренных ГВ 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 при выводе собственных частот ГВ из диапазона частот, где проводу требуется защита от вибрации. С помощью подбора формы грузов и длины рабочей части упругого элемента возможны перемещения первой пары собственных частот в зону частот, меньших нижней границы виброопасного для провода АС 150/24 диапазона частоты, а второй пары собственных частот — в зону частот, больших верхней границы этого диапазона.

Этот принцип заложен в основу ГВ ГВТ-1,6-11-600, конструкция которого разработана в АО «НТЦ ФСК ЕЭС» и защищена патентом РФ [8]. 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 K_3 показывает, что ГВ защищает провод от вибрации в диапазонах частоты 5,9–43,59 Гц, т.е. этот ГВ защищает провод АС 150/24 в диапазонах частот, составляющих 93,6% значения виброопасного для провода диапазона.

Более того, на частоте 4,1–5,9 Гц, когда не удалось выполнить измерение коэффициента K_3 , его расчетные значения также были меньше единицы.

Сравнение графиков эффективности работы на проводе 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 этого провода лучше использовать ГВ ГВТ-1,6-11-600.

Выводы. 1. Коэффициент эффективности работы на проводе ГВ является своеобразным паспортом гасителя вибрации, включающим необходимую информацию при проектировании или эксплуатации ВЛ.

2. Повышение эффективности работы ГВ на проводе возможно при выводе собственных частот ГВ из виброопасного диапазона, где проводу требуется защита от вибрации.

3. Гаситель вибрации ГВТ-1,6-11-600 защищает провод АС 150/24 в диапазонах частот, составляющих 93,6% виброопасного диапазона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Правила** устройства электроустановок. Изд. 7-е. – М.: НТЦ «ЭНАС», 2003.

2. **РД 34.20.189-90.** Методические указания по типовой защите от вибрации и субко-лебаний проводов и грозозащитных тросов воздушных линий электро-передачи напряжением 35–750 кВ. – М.: СПО ОРГРЭС, 1991.

3. **Стандарт МЭК 61897:1998.** Воздушные линии. Требования к гасителям эоловой вибрации Стокбриджа и их испытания.

4. **ГОСТ Р 51155-17.** Арматура линейная. Правила приемки и методы испытаний. – М.: Госстандарт.

5. **ГОСТ 839-80.** Провода неизолированные для воздушных линий электропередачи. Технические условия. – М.: Госстандарт.

6. **Трофимов С.В.** Определение границ основного и расширенного диапазонов частот вертикальной составляющей периодической нагрузки на проводе. – ЭЛЕКТРО, 2014, № 2.

7. **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.

8. **Патент РФ № 2 484 568.** «Гаситель вибрации проводов»/С.В. Трофимов. – БИ, 2011, № 16.

[18.09.2017]

А в т о р: Трофимов Сергей Викторович окончил энергомашиностроительный факультет Московского энергетического института в 1970 г. В 1980 г. защитил кандидатскую диссертацию по динамике металлоконструкций роторного экскаватора. Старший научный сотрудник АО «НТЦ ФСК ЕЭС».

Elektrichestvo (Electricity), 2018, No. 1, pp. 57–60

DOI:10.24160/0013-5380-2018-1-57-60

Results from Experimentally Checking the Performance of Vibration Dampers

TROFIMOV Sergei V. (OJSC «Scientific and Technical Centre of the Federal Grid Company of the Unified Energy System», Moscow, Russia)—Senior Scientific Researcher

Tests on determining the performance of vibration dampers (VDs) on a wire proceeding from the wire vibration energy dissipation intensity does not fully characterize the positive gain from using some or other type of VDs. This test does not give an answer to the main question: whether or not the VD reduces the maximal bending stresses in the wire dangerous cross-sections at all natural vibration frequencies in the vibration-hazardous frequency band, in which the wire needs protection from vibration. Full information on the gain from using a particular vibration damper for protecting a particular wire can only be received from the factor of its performance efficiency on this wire, obtained in the course of tests on determining the VD performance efficiency in the “wire–vibration damper” system from the value of maximal cyclic bending stresses. The article considers the possibility of using the results from tests on determining the performance efficiency factors for the GPG-1.6-11-450, GVU(M)-1.6/2.4, and GVT-1.6-11-600 vibration dampers on an AS 150/24 wire for estimating the parameters of the optimal VD for this wire.

Key words: wire, vibration, vibration damper, damper performance efficiency

REFERENCES

1. **Правила устройства электроустановок (PUE)** (Russian Electrical Installation Code). 7th edit. Moscow: ENAS, 2003.

2. **RD 34.20.189-90.** *Metodicheskiye ukazaniya po tipovoi zashchite ot vibratsii* (Methodical Guidelines on Standard Protection of Overhead Power Line Wires and Ground Wires from Vibration and Subvibration). – Moscow, 1991.

3. **Стандарт МЭК 61897: 1998.** *Vozdushnye linii Trebovaniya k gasitelyam* (IEC 61897:1998. Overhead Lines. Requirements for Stockbridge Aeolian Vibration Dampers and Their Tests).

4. **ГОСТ Р 51155-17.** *Armaturnaya lineinaya. Pravila priyemki i metody ispytaniy* (Line Accessories. Acceptance Rules and Test Methods) – Moscow: Gosstandard.

5. **ГОСТ 838-80.** Uninsulated wires for overhead power lines. Technical specifications. Moscow: Gosstandard.

6. **Трофимов С.В.** *ELEKTRO – in Russ. (ELECTRO)*, 2014, No. 2, pp.

7. **Трофимов С.В.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2013, No. 11, pp. 14–18.

8. **Patent RF No. 2484568.** *Gasitel' vibratsii provodov* (Extinguisher of vibration of wires)/S.V. Trofimov. Bulletin of inventions, 2011, No. 16.

[18.09.2017]