

Эффективность гасителей вибрации

Трофимов С.В.
ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»,
Ст. н. с., к. т. н.

Схема опытного пролета ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС» для испытаний гасителей вибрации на эффективность работы на проводе

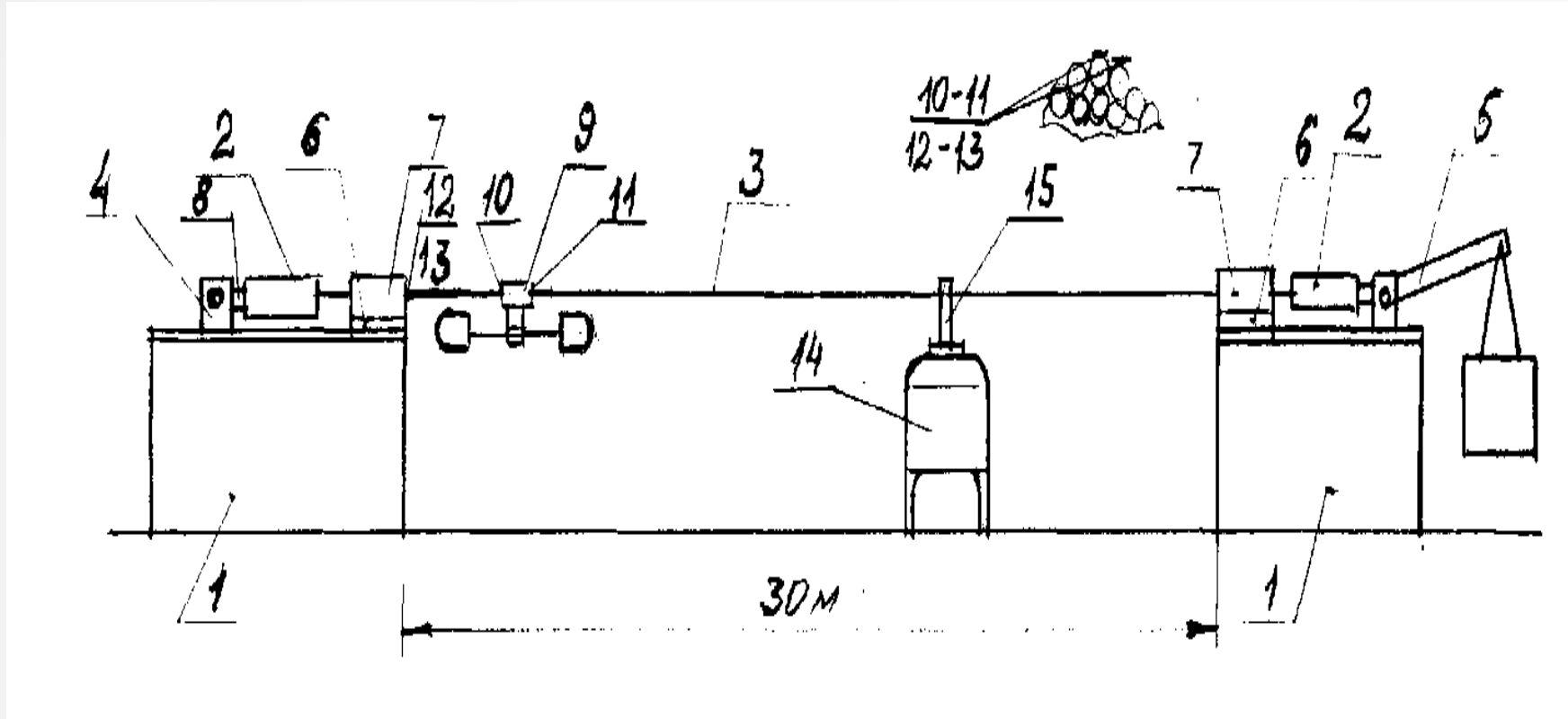
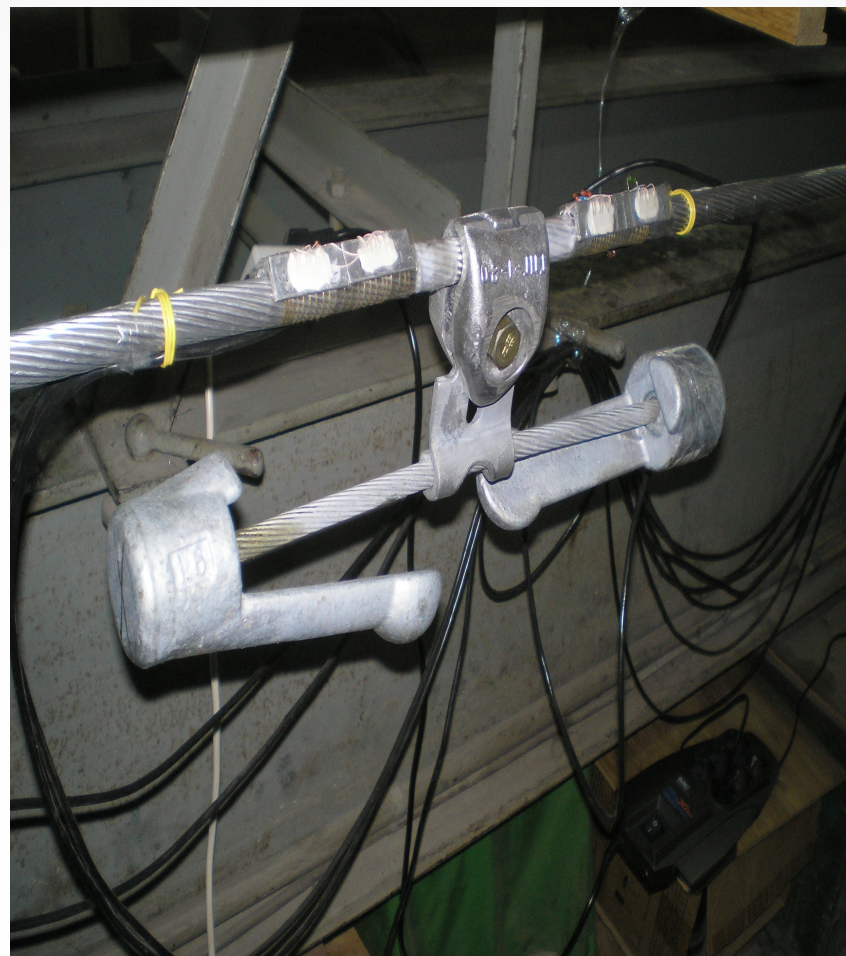


Рис. 21. Схема опытного пролета, выполненного согласно рекомендациям Стандарта МЭК 61897:1998.

Опытный пролет для испытаний гасителей вибрации на эффективность работы на проводе



Величины изгибающих напряжений в опасных сечениях провода АС 150/24 с гасителем вибрации ГПГ-1,6-11-450 и без гасителя

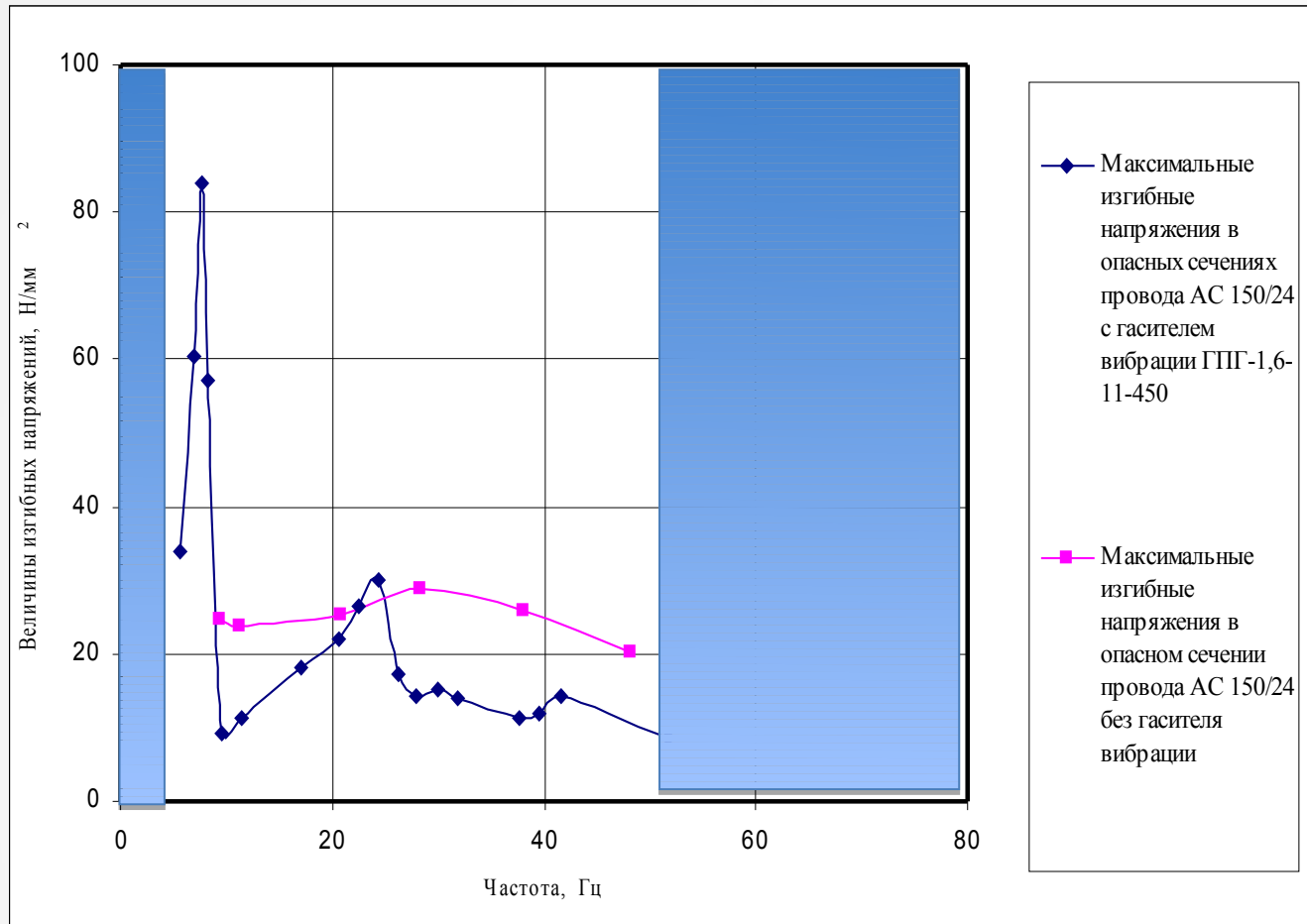
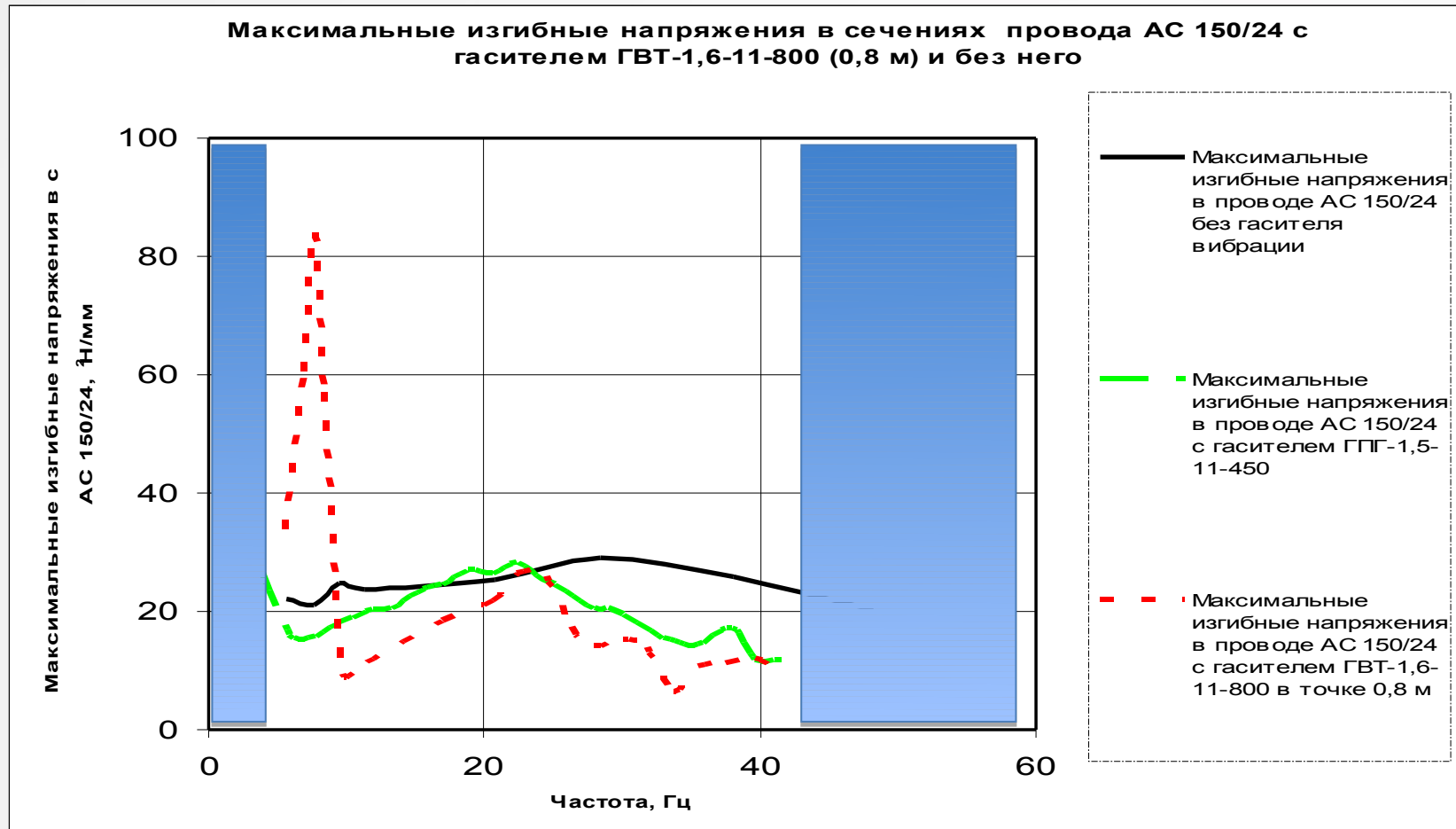
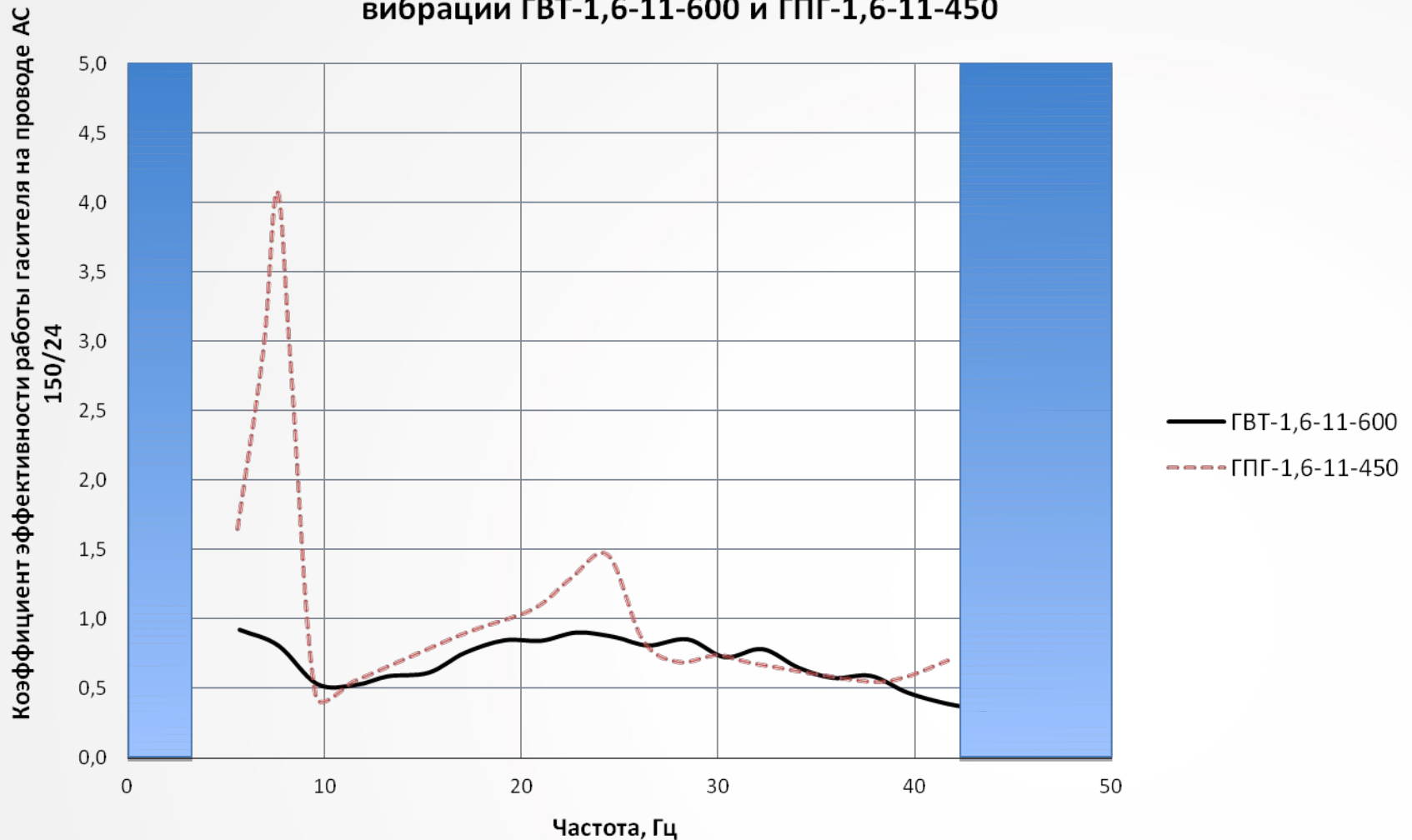


Рис. 23. Экспериментальные изгибающие напряжения в сечениях образца провода АС 150/24 на выходе его из поддерживающего зажима и на входе-выходе провода слева и справа от зажима гасителя вибрации ГПГ-1,6-11-450

Максимальные изгибные напряжения в сечениях провода АС 150/24 с гасителями ГВТ-1,6-11-800, ГПГ-1,6-11-450 и без них



Коэффициенты эффективности работы на проводе АС 150/24 гасителей вибрации ГВТ-1,6-11-600 и ГПГ-1,6-11-450



Вибрация проводов (тросов) – 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). (ПУЭ-7, раздел 2, глава 2.5, п. 2.5.3) [1].

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 гаситель вибрации.

Подробный алгоритм выбора оптимального гасителя для провода и места размещения гасителя 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 и субколебаний проводов и грозозащитных тросов ...» [2].

Гасители вибрации типа Стокбриджа

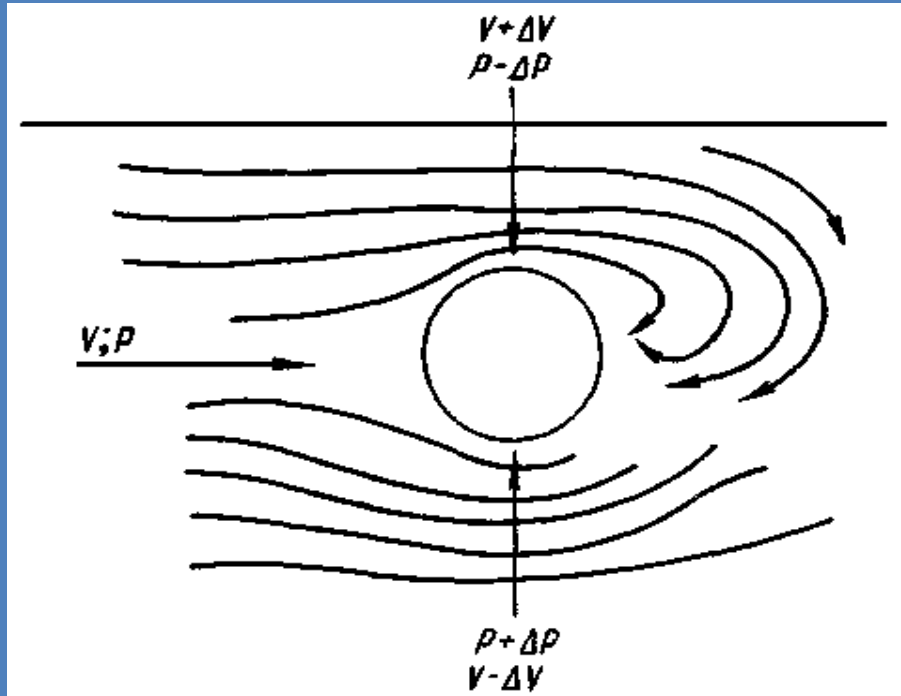
- Практически все воздушные линии электропередачи (ВЛ) в той или иной степени подвержены вибрации проводов, вызываемой действием ветра. Следствием этого могут стать усталостные повреждения проволок как наружных, так и внутренних повивов проводов. Наиболее вероятными местами расположения зон опасных усталостных повреждений являются места входа проводов в поддерживающие зажимы, в зажимы крепления на проводах гасителей вибрации и пляски, а также в соединители различных типов [3-5].
- Для защиты провода от усталостных повреждений, возникающих в местах его выхода из поддерживающих зажимов, в соответствии с ПУЭ-7 (раздел 2, глава 2.5, п. 2.5.85), широко применяются гасители вибрации типа Стокбриджа [1].
- 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.

Выбор оптимального гасителя

Подробный алгоритм выбора оптимального гасителя для провода и места размещения гасителя 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 и субколебаний проводов и грозозащитных тросов ...» [2].

Однако, за 20 лет, прошедших с момента вступления в силу РД 34.20.189-90, а также развития исследований, посвященных вибрации проводов в ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС» и других организациях, появилась необходимость уточнить некоторые положения этого РД.

Схема вихреобразования за проводом



$$\nu = 200 \nu / D,$$

где ν - частота
образования
воздушных вихрей, Гц;
 ν - скорость ветра, м/с;
 D - диаметр провода,
мм.

Рис. 1. Схема вихреобразования за проводом

Определение диапазона частот, в котором проводу требуется защита от вибрации

- Провод АС 150/24, имеющий диаметр 17,1 мм, согласно рекомендациям, изложенным в РД 34.20.189-90 «Методические указания по типовой защите ...» [2], необходимо защищать в диапазоне величин поперечной составляющей скорости ветра от 0,6 м/с до 7,0 м/с. Именно в этом диапазоне скоростей поперечной составляющей ветра за проводом в устойчивом режиме периодически возникают и срываются воздушные вихри.

Определение рабочего диапазона частот гасителя вибрации для провода АС 150/24

Диапазон частот появления вихрей Кармана за проводом:

От $n_{\text{мин}} = 7,02$ цикл/с

до $n_{\text{макс}} = 87,87$ цикл/с

Диапазон частот периодической составляющей вертикальной нагрузки на провод
(первая – основная гармоника):

От $f_{\text{мин}} = 3,51$ Гц

до $f_{\text{макс}} = 43,94$ Гц

Диапазон частот периодических составляющих вертикальной нагрузки на провод
(первая и вторая гармоники):

От $f_{\text{мин}} = 3,51$ Гц

до $f_{\text{макс}} = 87,87$ Гц

Вертикальная периодическая составляющая поперечной нагрузки на провод

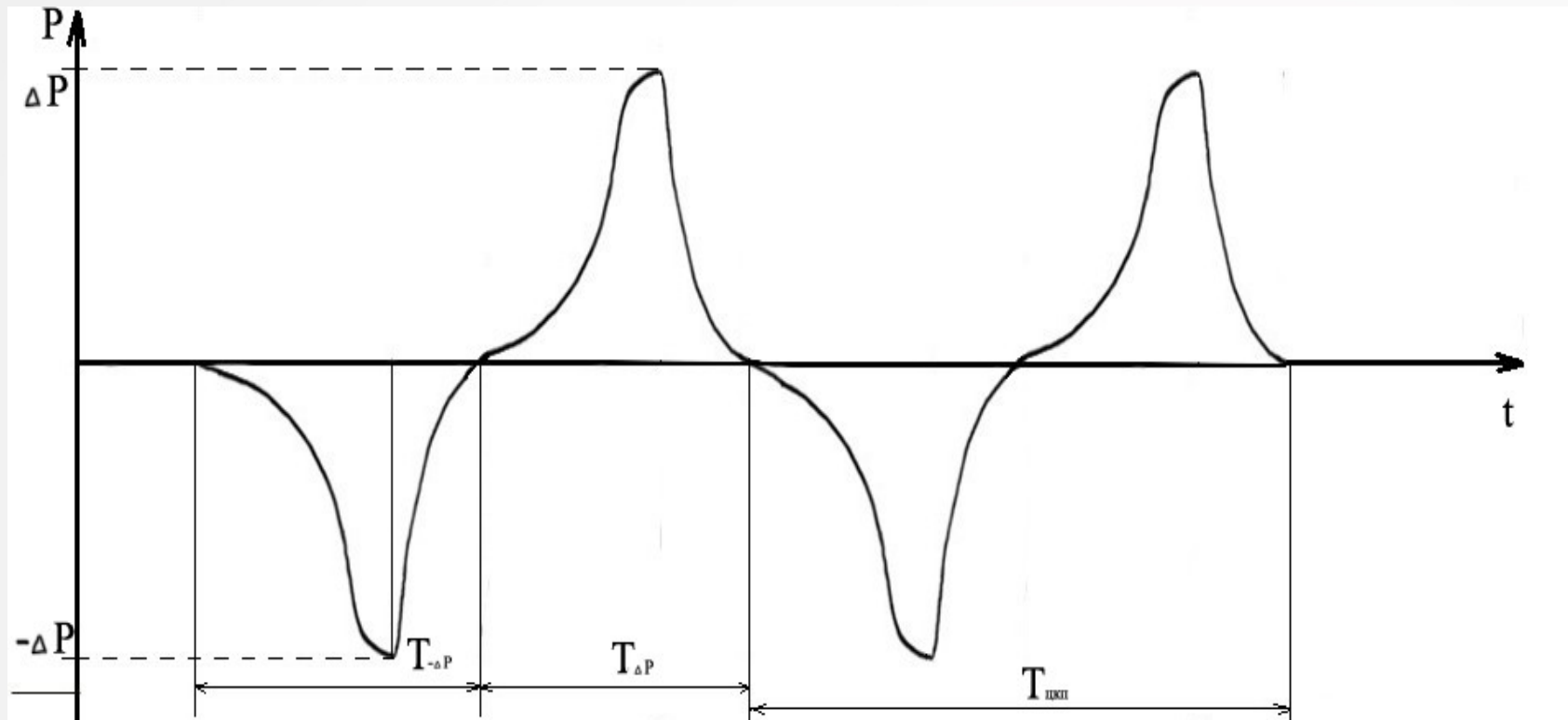


Рис. 2. График периодической вертикальной составляющей ветровой нагрузки на провод

Представление вертикальной периодической составляющей нагрузки на провод в виде составляющих ряда Фурье

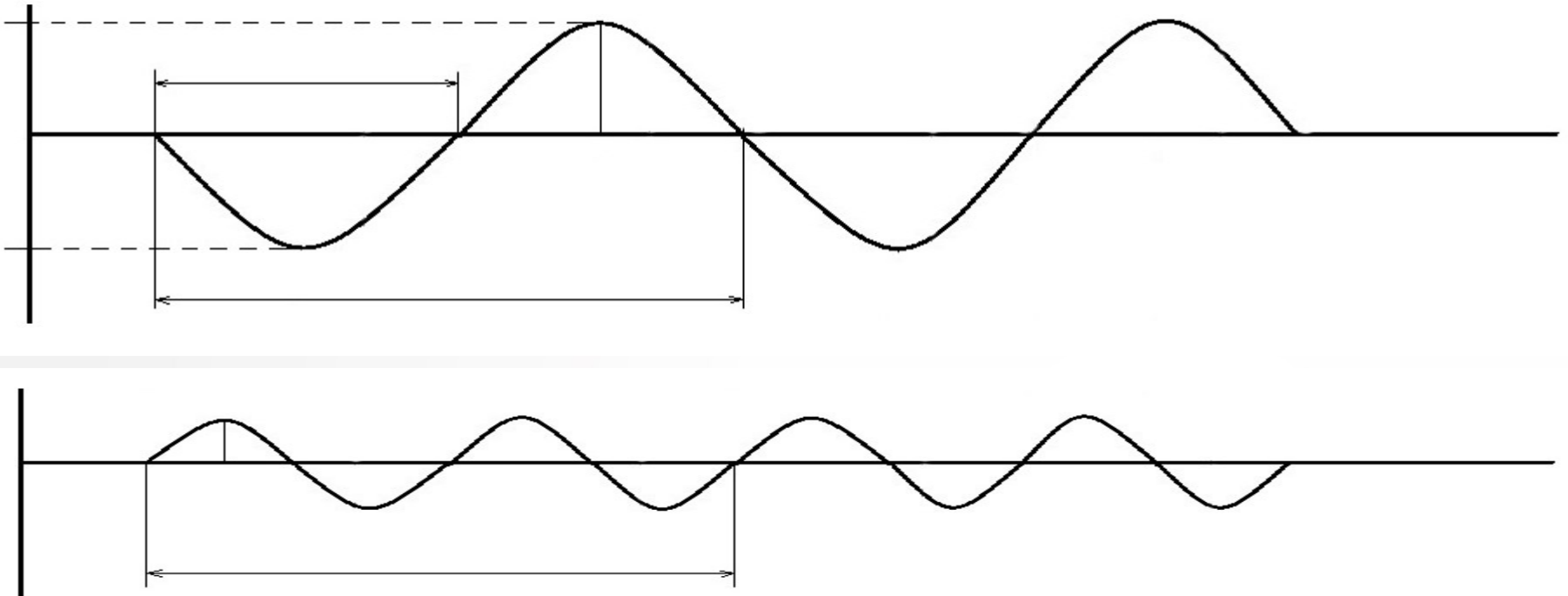


Рис. 3. График первой и второй составляющих ряда Фурье вертикальной периодической составляющей ветровой нагрузки на провод

Механическая модель провода с гасителем вибрации типа ГПГ, защищающим провод от усталостных повреждений

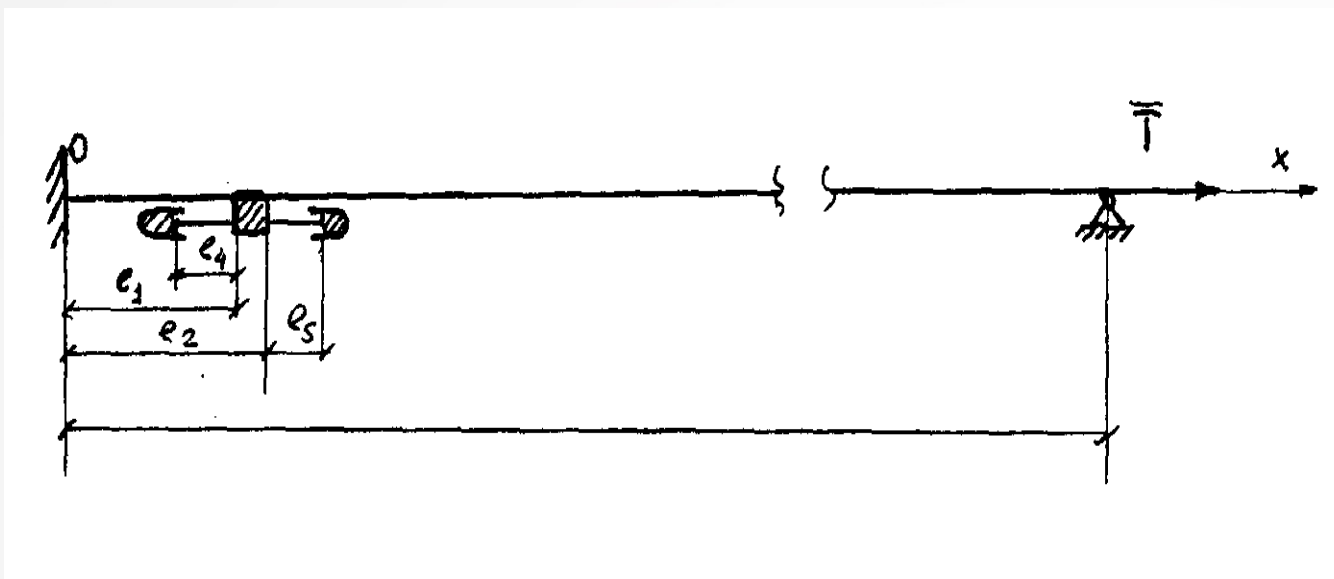


Рис. 4. Механическая модель провода с гасителем вибрации типа ГПГ, защищающим провод от усталостных повреждений в месте его выхода из поддерживающего зажима

Вибрационный электродинамический стенд ВЭДС-100Б

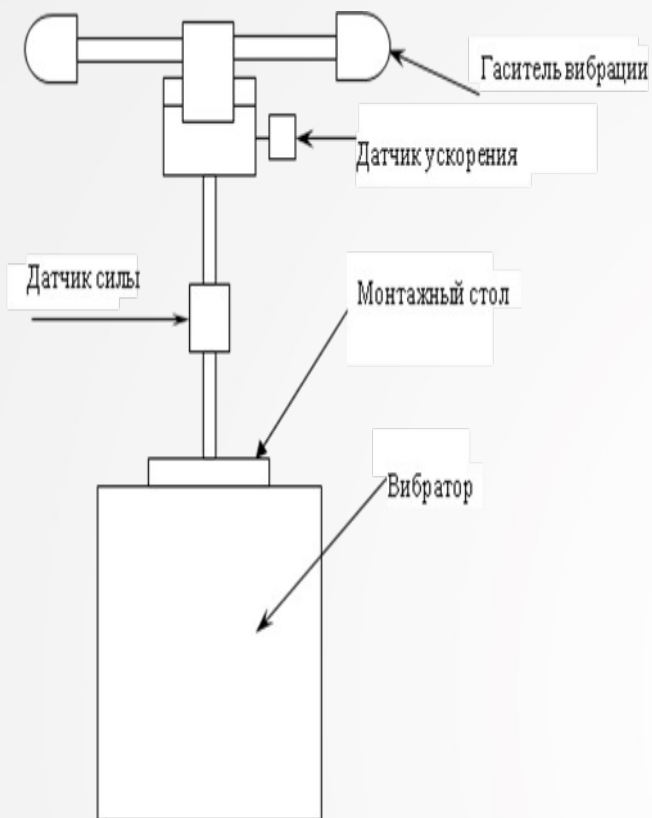
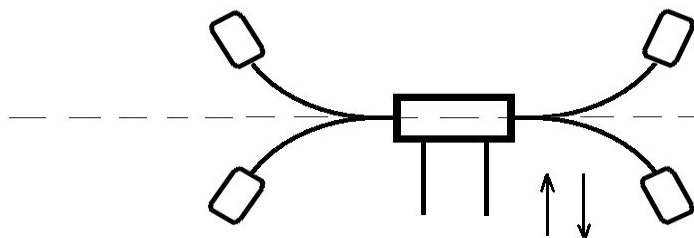


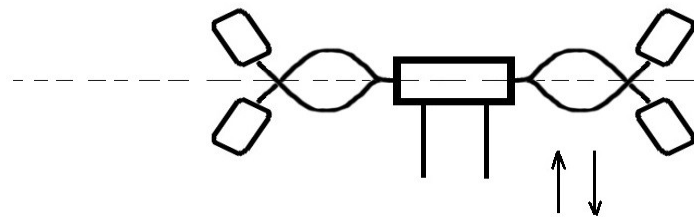
Рис. 5. Схема испытательной
установки



Первая и вторая собственные формы колебаний гасителя вибрации ГПГ



1 форма колебаний частей
упругого элемента гасителя
вибрации



2 форма колебаний частей
упругого элемента гасителя
вибрации

Исследование частотно-энергетических характеристик гасителя вибрации на вибрационном электродинамическом стенде



Рис. 6. График мощности процесса рассеивания энергии колебаний гасителем
вибрации ГПГ-0,8-9,1-300

Испытания гасителей вибрации на эффективность работы на проводе

- Стандарт МЭК 61897:1998 «Воздушные линии – Требования к гасителям эоловой вибрации Стокбриджа и их испытания» рекомендует выполнять кроме испытаний гасителей вибрации с целью определения частотно-энергетических характеристик испытания на эффективность работы гасителя вибрации на проводе.
- Стандарт МЭК 61897 рекомендует испытывать гаситель вибрации на эффективность работы на 10-15 характерных устойчивых формах колебаний (собственных формах колебаний провода с гасителем)

Уравнения изгибных колебаний механической системы «провод с гасителем вибрации»

Перемещения в вертикальной плоскости от положения статического равновесия точек продольных осей провода и частей упругого элемента гасителя вибрации с достаточной для практических целей точностью описываются двумя однородными дифференциальными уравнениями:

- для провода

$$E_i J_i \frac{\partial^4 W_i}{\partial x^4} - T \frac{\partial^2 W_i}{\partial x^2} + \rho_i F_i \frac{\partial^2 W_i}{\partial t^2} = 0 \quad (i=1,2,3)$$

- для частей упругих элементов гасителя вибрации

$$E_i J_i \frac{\partial^4 W_i}{\partial x^4} + \rho_i F_i \frac{\partial^2 W_i}{\partial t^2} = 0 \quad (i=4,5)$$

Решение уравнения свободных поперечных колебаний составного стержня

$$\begin{aligned}
 & \bullet \\
 & \bullet \\
 & \bullet \quad W_i(x,t) = \begin{cases} W1(x,t) & \text{при } 0 \leq x \leq l1; \\ W2(x,t) & \text{при } l1 < x \leq l2; \\ W3(x,t) & \text{при } l2 < x \leq l3; \\ W4(x,t) & \text{при } -l4 + l1 \leq x < l1; \\ W5(x,t) & \text{при } l2 \leq x < l2 + l5 \end{cases} \\
 & \bullet \\
 & \bullet
 \end{aligned}$$

$$W_i(x,t) = \sum_{j=1}^{\infty} V_j(x) \varphi_j(t),$$

$$V_j(x) = \begin{cases} C1e^{k1x} + C2e^{-k1x} + C3 \cdot \text{sink}2x + C4 \cdot \text{cosk}2x & \text{при } 0 \leq x \leq l1; \\ C5 \cdot e^{k3x} + C6 \cdot e^{-k3x} + C7 \cdot \text{sink}4x + C8 \cdot \text{cosk}4x & \text{при } l1 < x \leq l2; \\ C9 \cdot e^{k5x} + C10 \cdot e^{-k5x} + C11 \cdot \text{sink}6x + C12 \cdot \text{cosk}6x & \text{при } l2 < x \leq l3; \\ C13 \cdot e^{k7x} + C14 \cdot e^{-k7x} + C15 \cdot \text{sink}8x + C16 \cdot \text{cosk}8x & \text{при } -l4 + l1 \leq x < l1; \\ C17 \cdot e^{k9x} + C18 \cdot e^{-k9x} + C19 \cdot \text{sink}10x + C20 \cdot \text{cosk}10x & \text{при } l2 \leq x < l2 + l5 \end{cases}$$

Первая собственная форма колебаний образца провода АС 120/19 с гасителем ГПГ-1,6-11-450

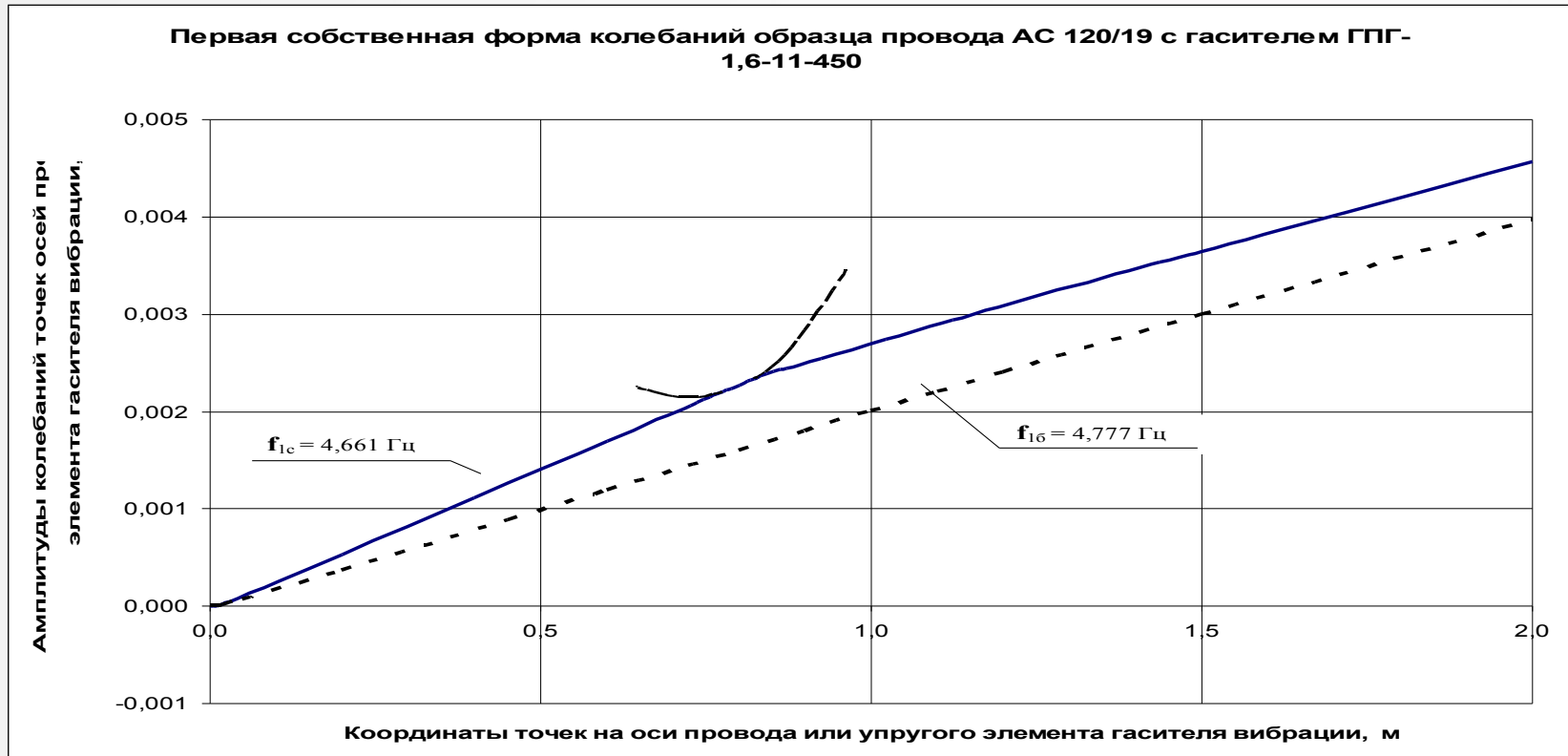


Рис. 7. Амплитуды колебаний провода АС 120/19 с гасителем вибрации типа ГПГ-1,6-11-450 (первая собственная форма колебаний)

Вторая собственная форма колебаний образца провода АС 120/19 с гасителем вибрации ГПГ-1,6 11-450

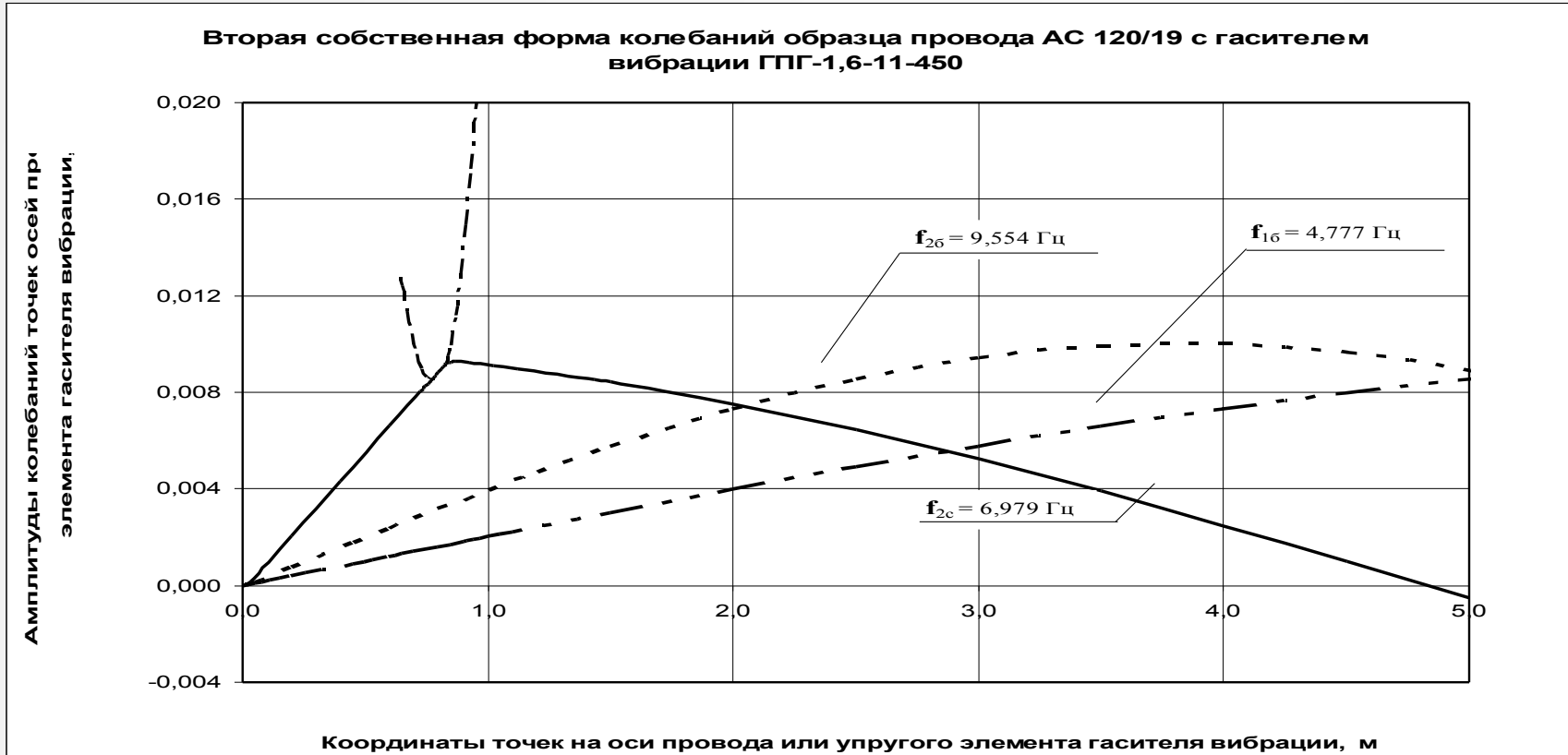


Рис. 8. Амплитуды колебаний провода АС 120/19 с гасителем вибрации типа ГПГ-1,6-11-450 (вторая собственная форма колебаний)

Третья собственная форма колебаний образца провода АС 120/19 с гасителем ГПГ-1,6-11-450



Рис. 9. Амплитуды колебаний провода АС 120/19 с гасителем вибрации типа ГПГ-1,6-11-450 (третья собственная форма колебаний)

Четвертая собственная форма колебаний образца провода АС 120/19 с гасителем ГПГ-1,6-11-450

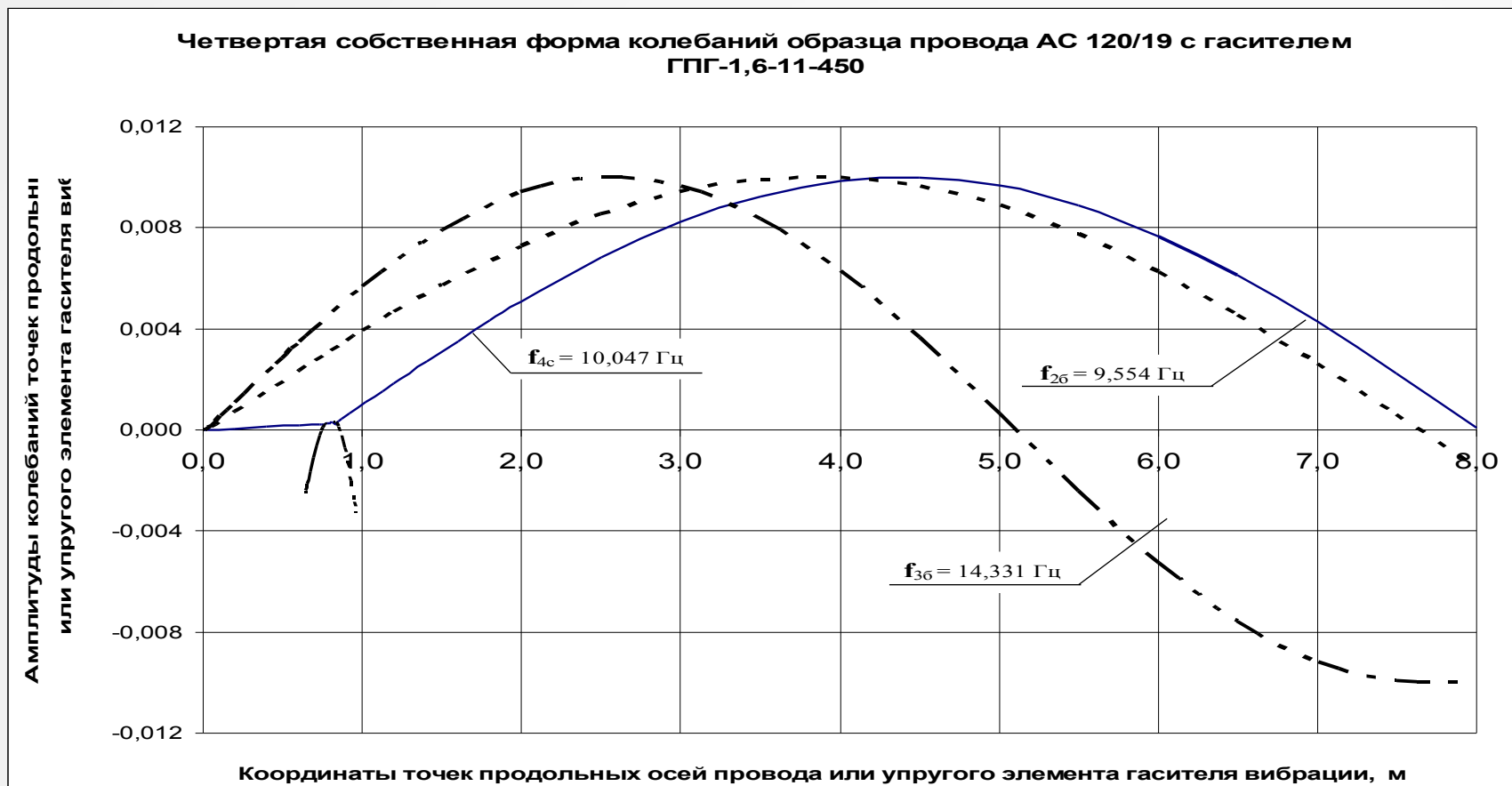


Рис. 10. Амплитуды колебаний провода АС 120/19 с гасителем вибрации типа ГПГ-1,6-11-450 (четвертая собственная форма колебаний)

Седьмая собственная форма колебаний образца провода АС 120/19 с гасителем ГПГ-1,6-11-450

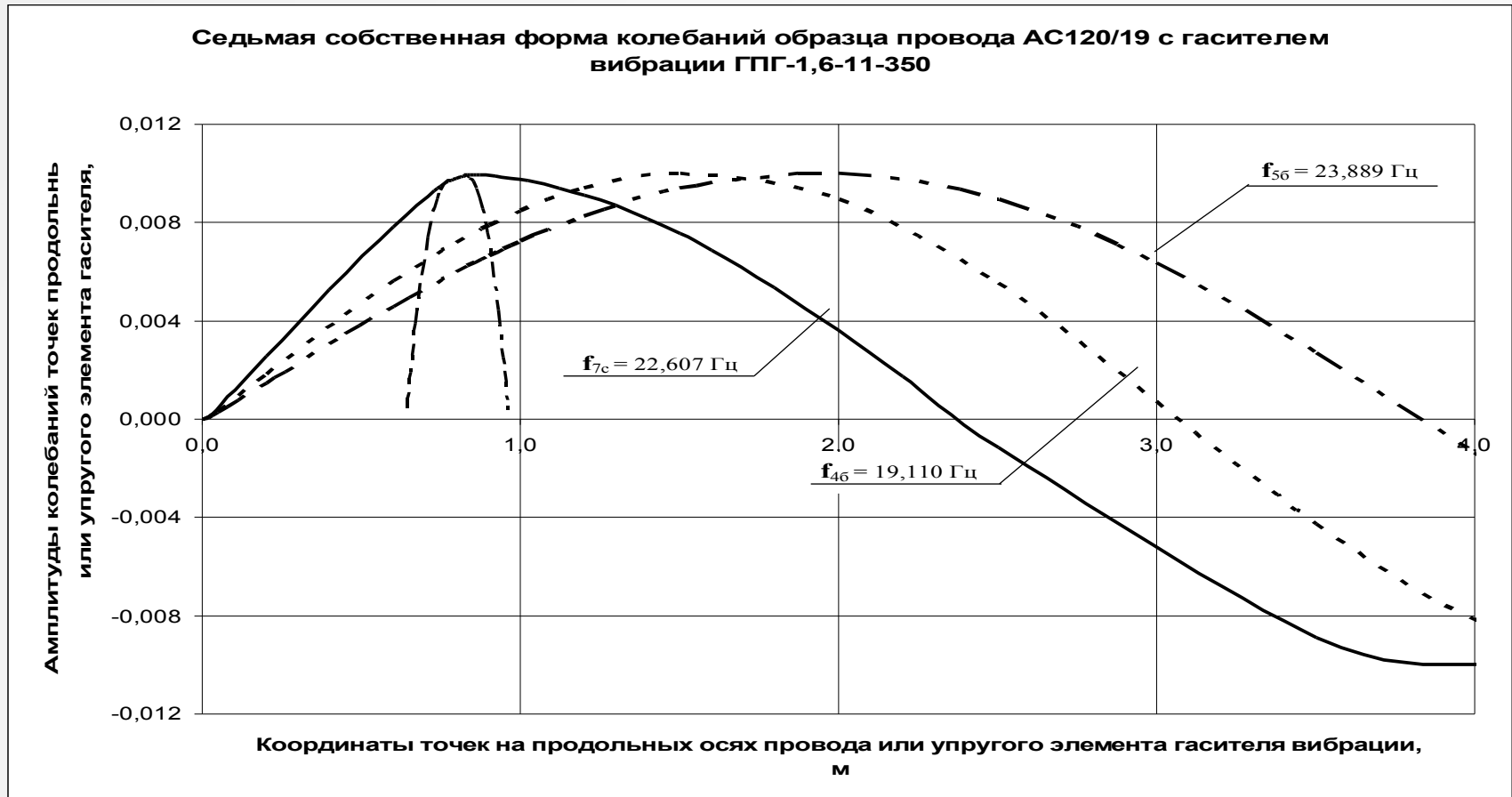


Рис. 11. Амплитуды колебаний провода АС 120/19 с гасителем вибрации типа ГПГ-1,6-11-450 (седьмая собственная форма колебаний)

Восьмая собственная форма колебаний образца провода АС 120/19 с гасителем ГПГ-1,6-11-450

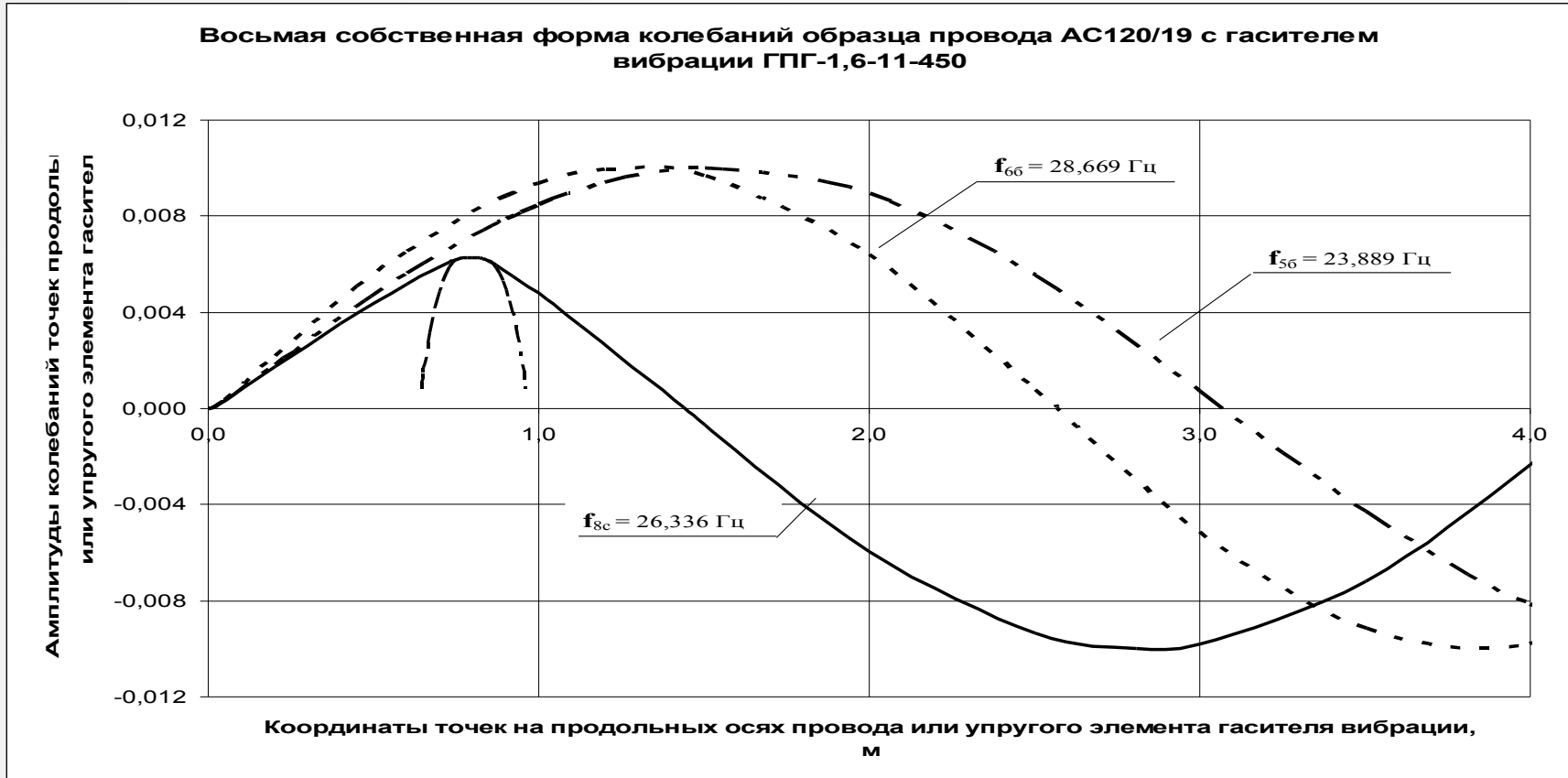


Рис. 12. Амплитуды колебаний провода АС 120/19 с гасителем вибрации типа ГПГ-1,6-11-450 (восьмая собственная форма колебаний)

Десятая собственная форма колебаний образца провода АС 120/19 с гасителем ГПГ-1,6-11-450

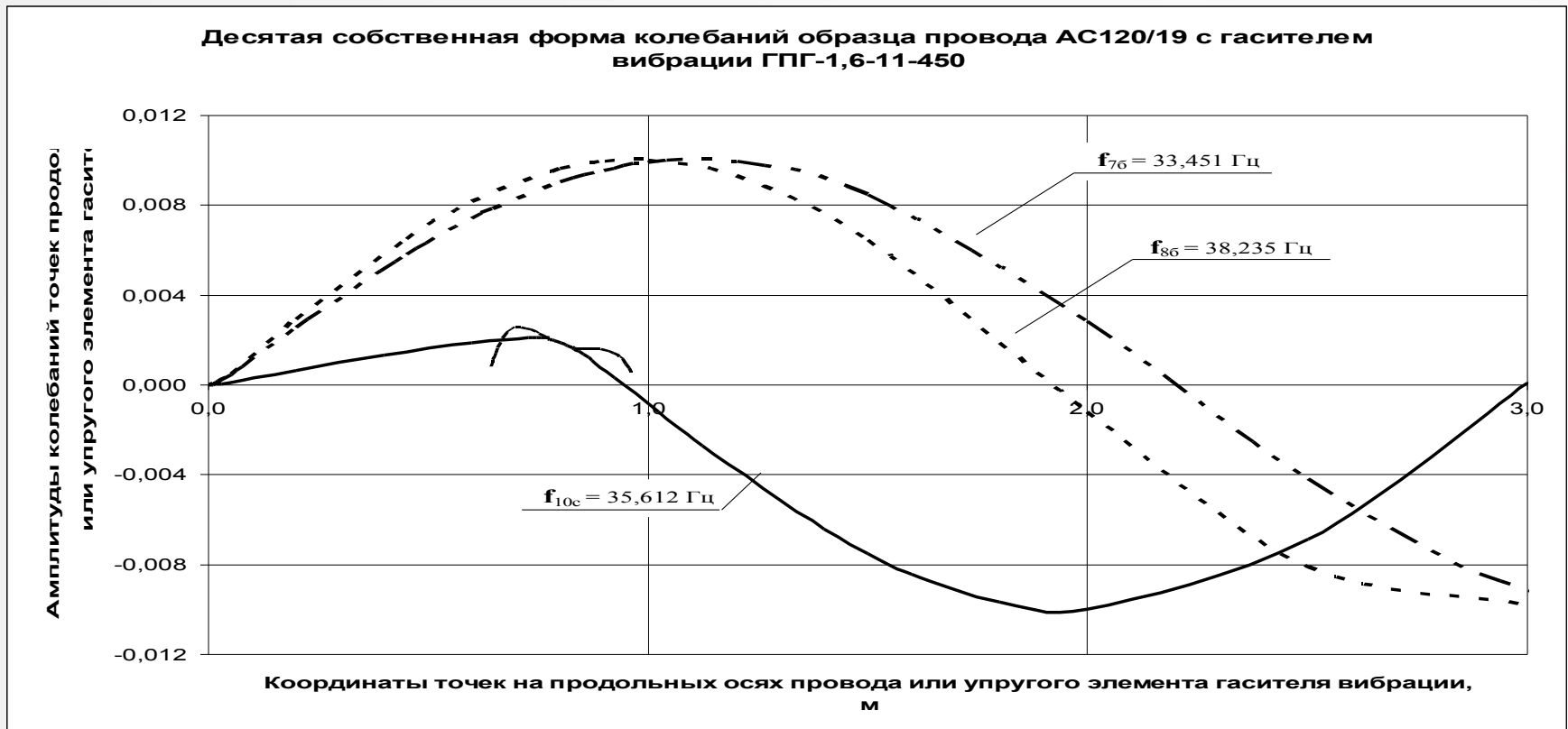


Рис. 13. Амплитуды колебаний провода АС 120/19 с гасителем вибрации типа ГПГ-1,6-11-450 (десятая собственная форма колебаний)

Одиннадцатая собственная форма колебаний образца провода АС 120/19 с гасителем ГПГ-1,6-11-450

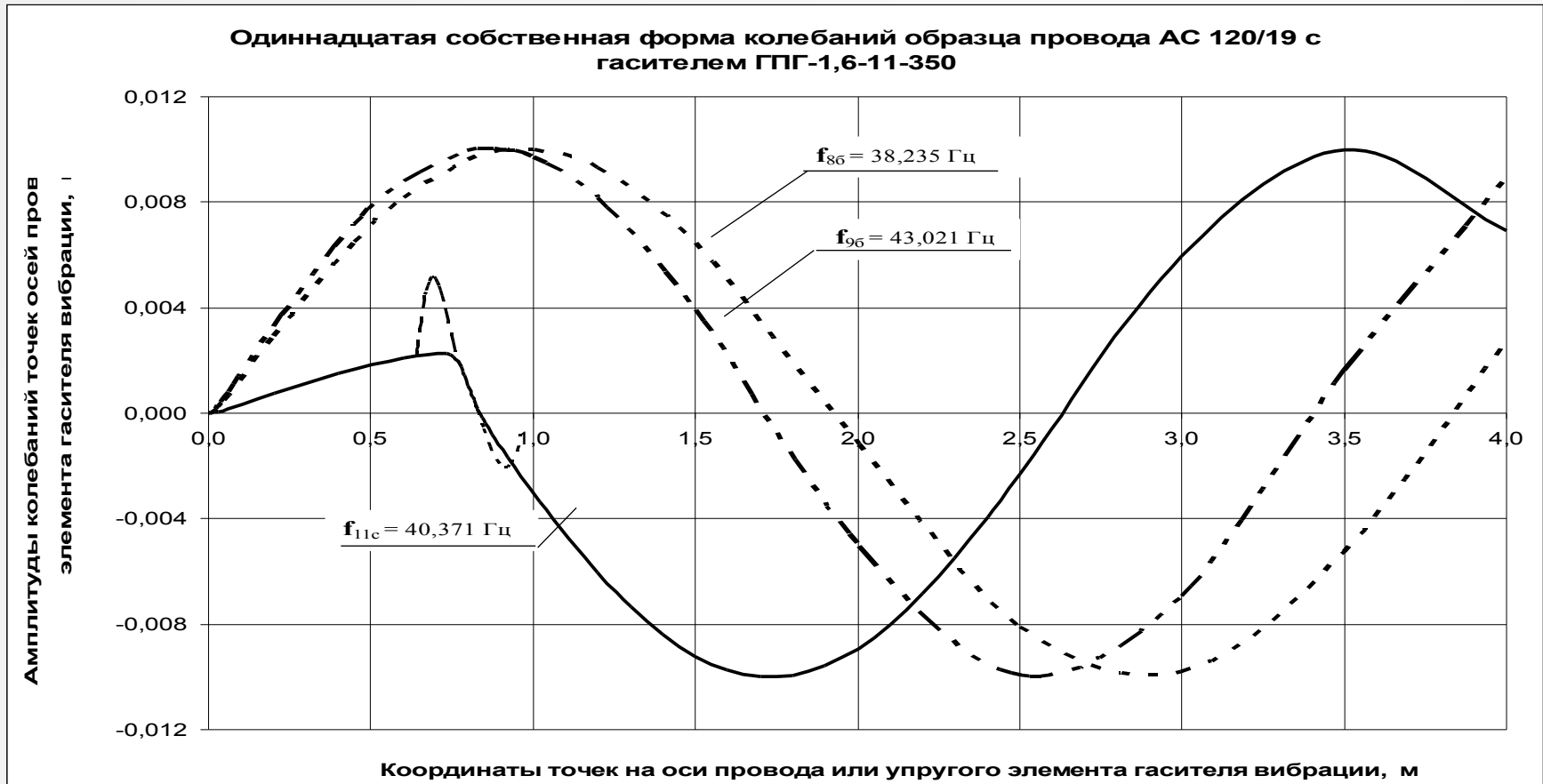


Рис. 14. Амплитуды колебаний провода АС 120/19 с гасителем вибрации типа ГПГ-1,6-11-450 (одиннадцатая собственная форма колебаний)

Двенадцатая собственная форма колебаний образца провода АС 120/19 с гасителем ГПГ-1,6-11-450

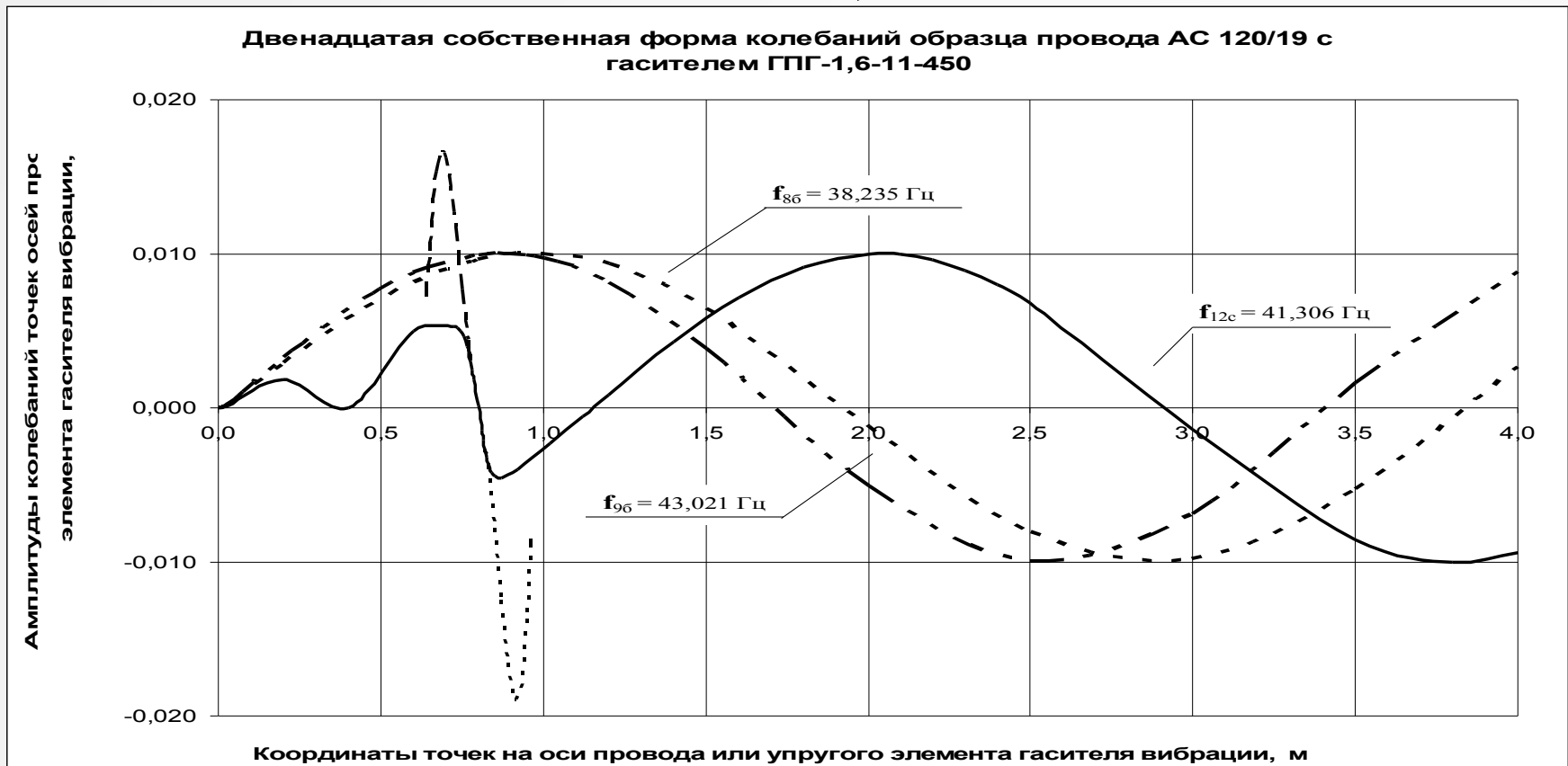


Рис. 15. Амплитуды колебаний провода АС 120/19 с гасителем вибрации типа ГПГ-1,6-11-450 (двенадцатая собственная форма колебаний)

Тринадцатая собственная форма колебаний образца провода АС 120/19 с гасителем ГПГ-1,6-11-450

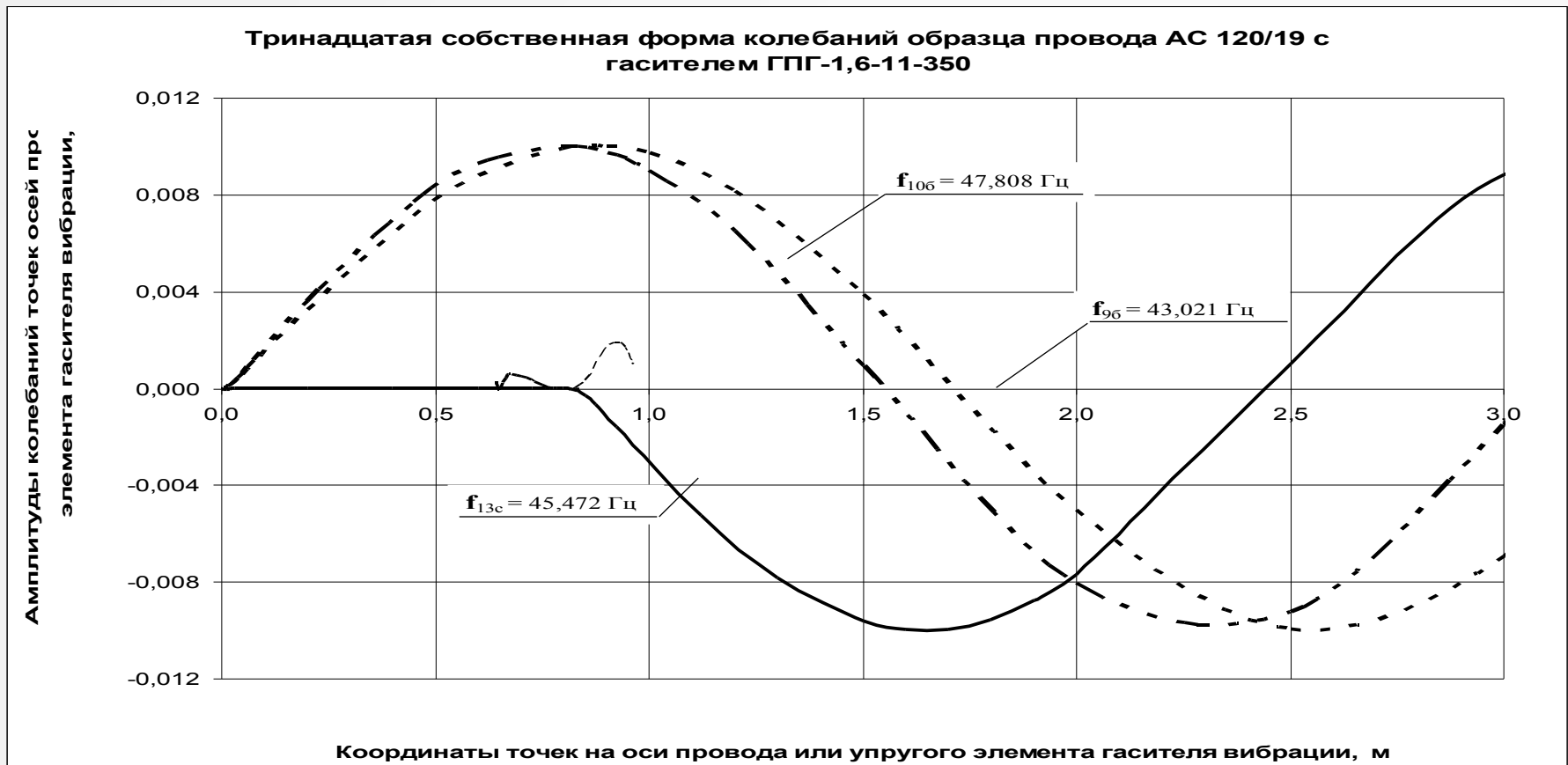


Рис. 16. Амплитуды колебаний провода АС 120/19 с гасителем вибрации типа ГПГ-1,6-11-450 (тринадцатая собственная форма колебаний)

Четырнадцатая собственная форма колебаний образца провода АС 120/19 с гасителем ГПГ-1,6-11-450



Рис. 17. Амплитуды колебаний провода АС 120/19 с гасителем вибрации типа ГПГ-1,6-11-450 (четырнадцатая собственная форма колебаний)

Изгибающие моменты в сечениях образца провода АС 120/19 на выходе его из поддерживающего зажима и на входе-выходе провода слева и справа от зажима гасителя вибрации ГПГ-1,6-11-450

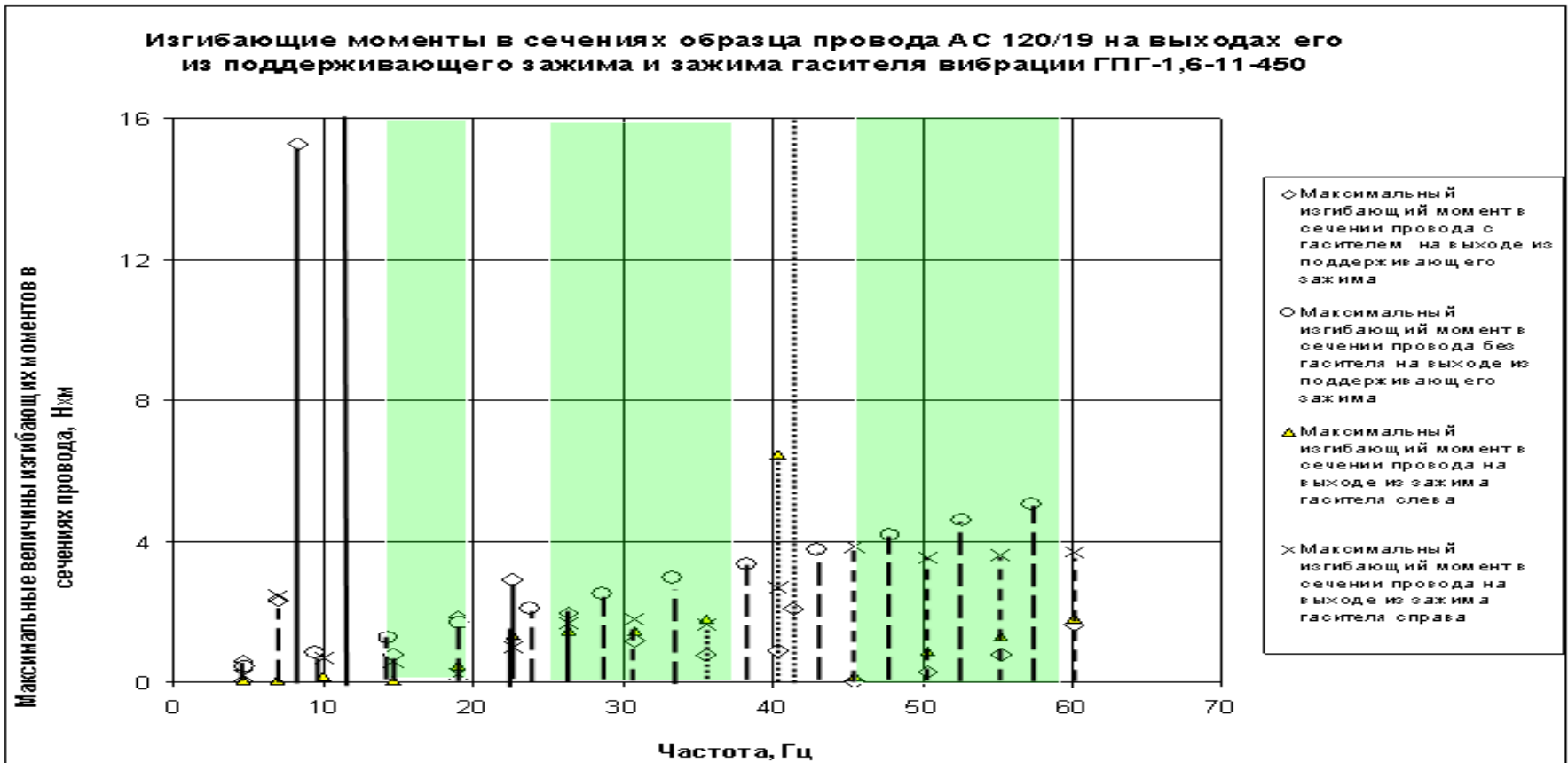


Рис. 18. Изгибающие моменты в сечениях образца провода АС 120/19 на выходе его из поддерживающего зажима и на входе-выходе провода слева и справа от зажима гасителя вибрации ГПГ-1,6-11-450

Изгибающие моменты в сечениях образца провода АС 120/19

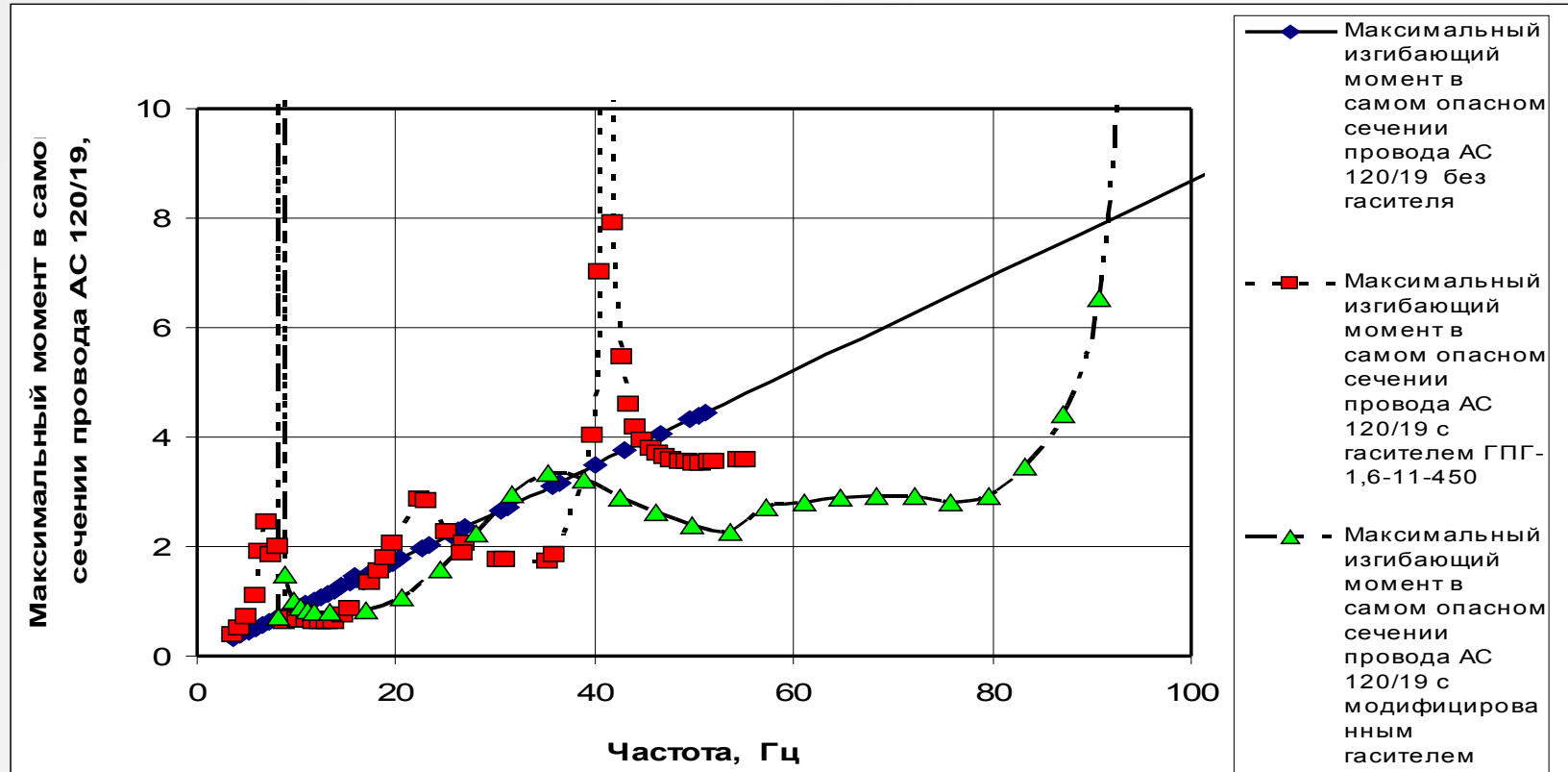


Рис. 19. Изгибающие моменты в сечениях образца провода АС 120/19 на выходе его из поддерживающего зажима и на входе-выходе провода слева и справа от зажима гасителя вибрации ГПГ-1,6-11-450

Максимальные изгибающие моменты в самых опасных сечениях образцов провода АС 120/19 различной длины с ГВ ГПГ-1,6-11-450 и без него.

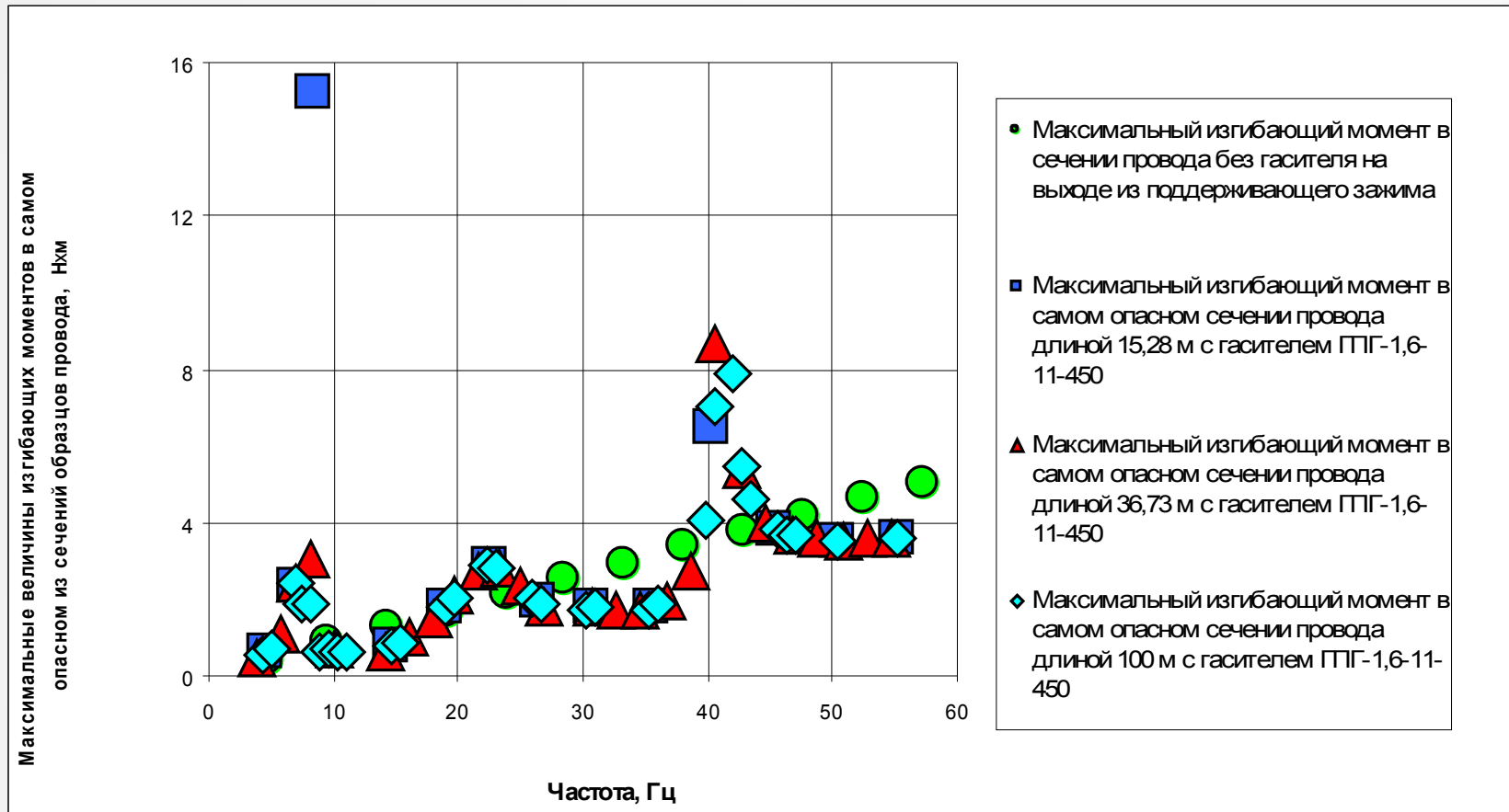


Рис. 20. Максимальные изгибающие моменты в самых опасных сечениях образцов провода АС 120/19 различной длины с ГВ ГПГ-1,6-11-450 и без него

Схема опытного пролета ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС» для испытаний гасителей вибрации на эффективность работы на проводе

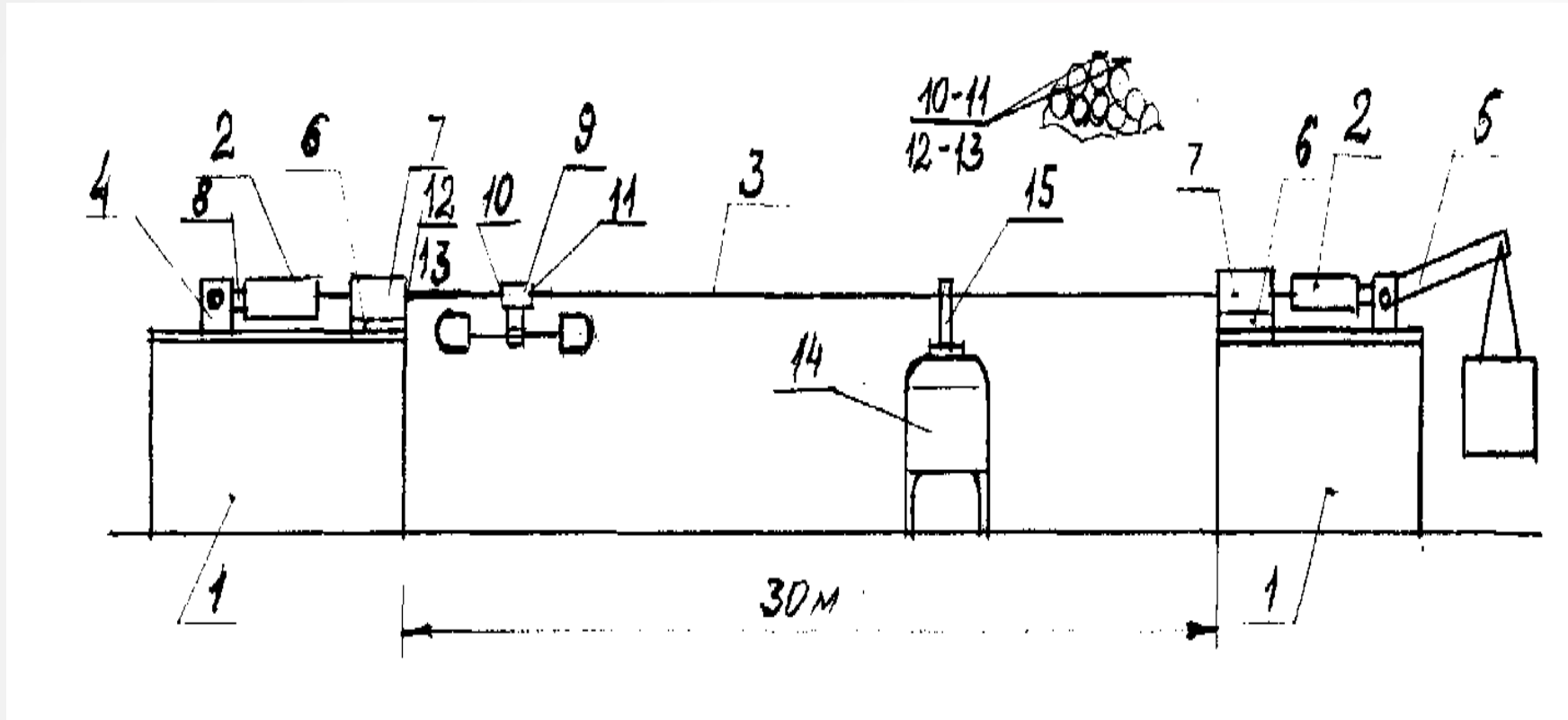
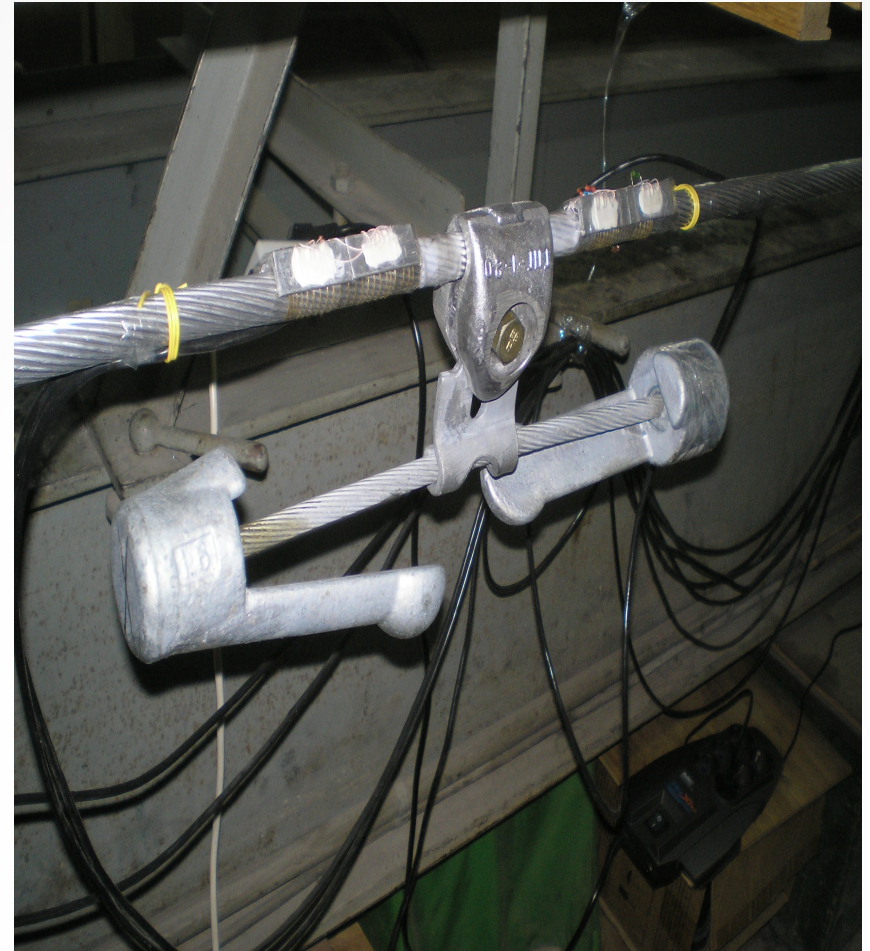


Рис. 21. Схема опытного пролета, выполненного согласно рекомендациям Стандарта МЭК 61897:1998.

Опытный пролет для испытаний гасителей вибрации на эффективность работы на проводе



Определение оптимального гасителя вибрации для провода на основании полученных экспериментально величин изгибающих напряжений в опасных сечениях образца провода с гасителем

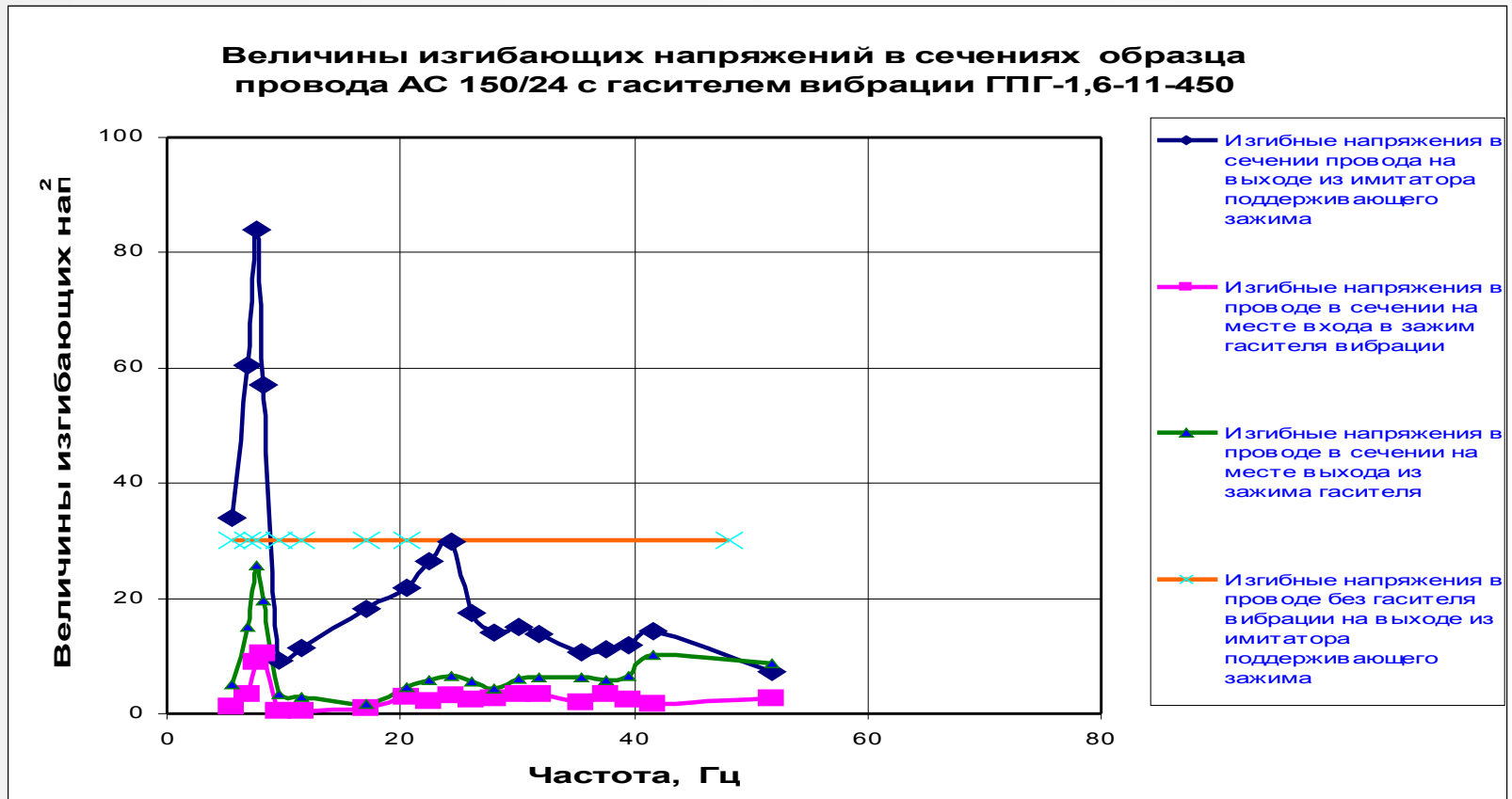


Рис. 22. Экспериментальные изгибающие напряжения в сечениях образца провода АС 150/24 на выходе его из поддерживающего зажима и на входе-выходе провода слева и справа от зажима гасителя вибрации ГПГ-1,6-11-450

Величины изгибающих напряжений в опасных сечениях провода АС 150/24 с гасителем вибрации ГПГ-1,6-11-450 и без гасителя

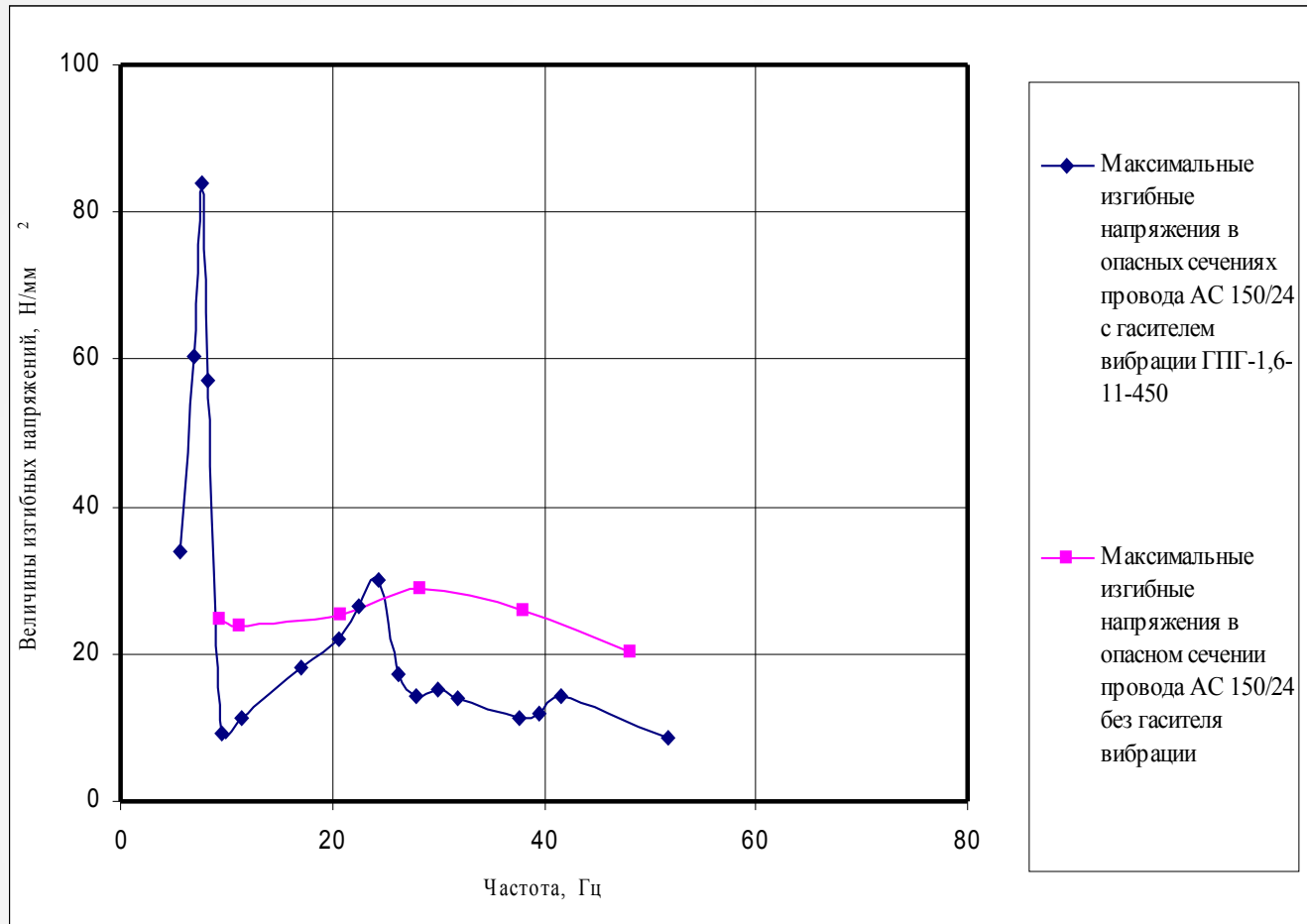
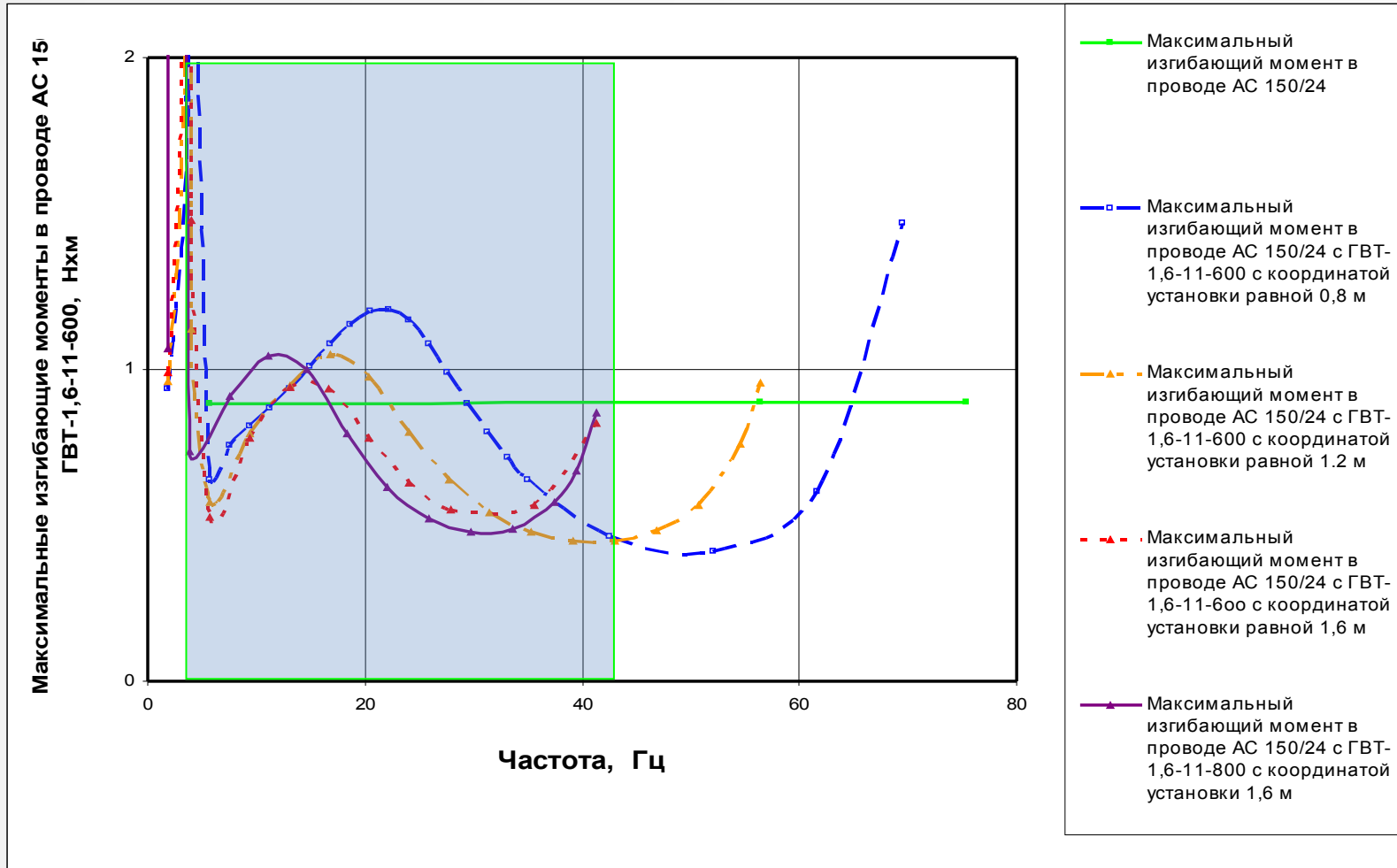
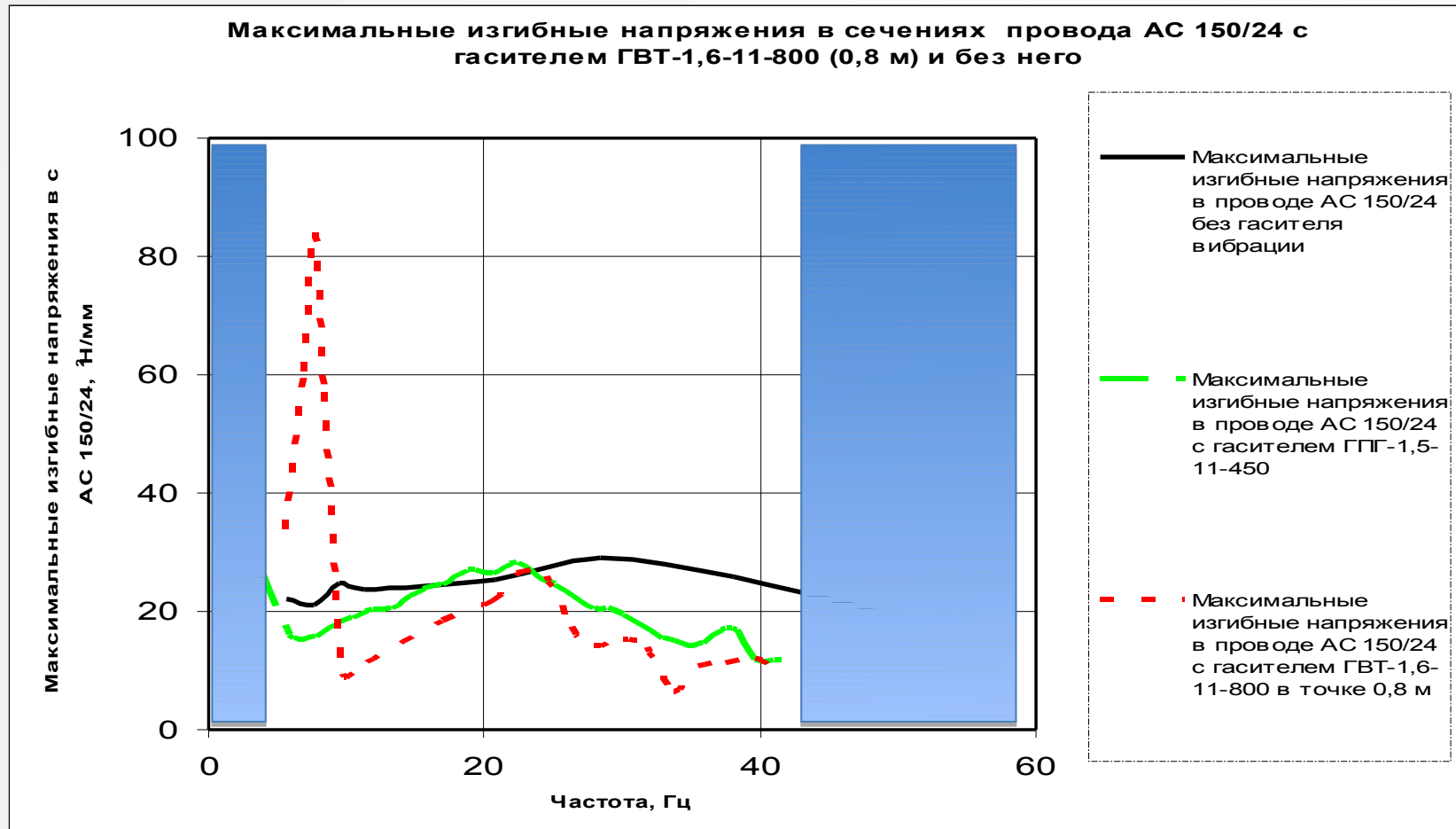


Рис. 23. Экспериментальные изгибающие напряжения в сечениях образца провода АС 150/24 на выходе его из поддерживающего зажима и на входе-выходе провода слева и справа от зажима гасителя вибрации ГПГ-1,6-11-450

Максимальные изгибающие моменты в проводе АС 150/24 с ГВТ-1,6-11-450 в разных местах установки

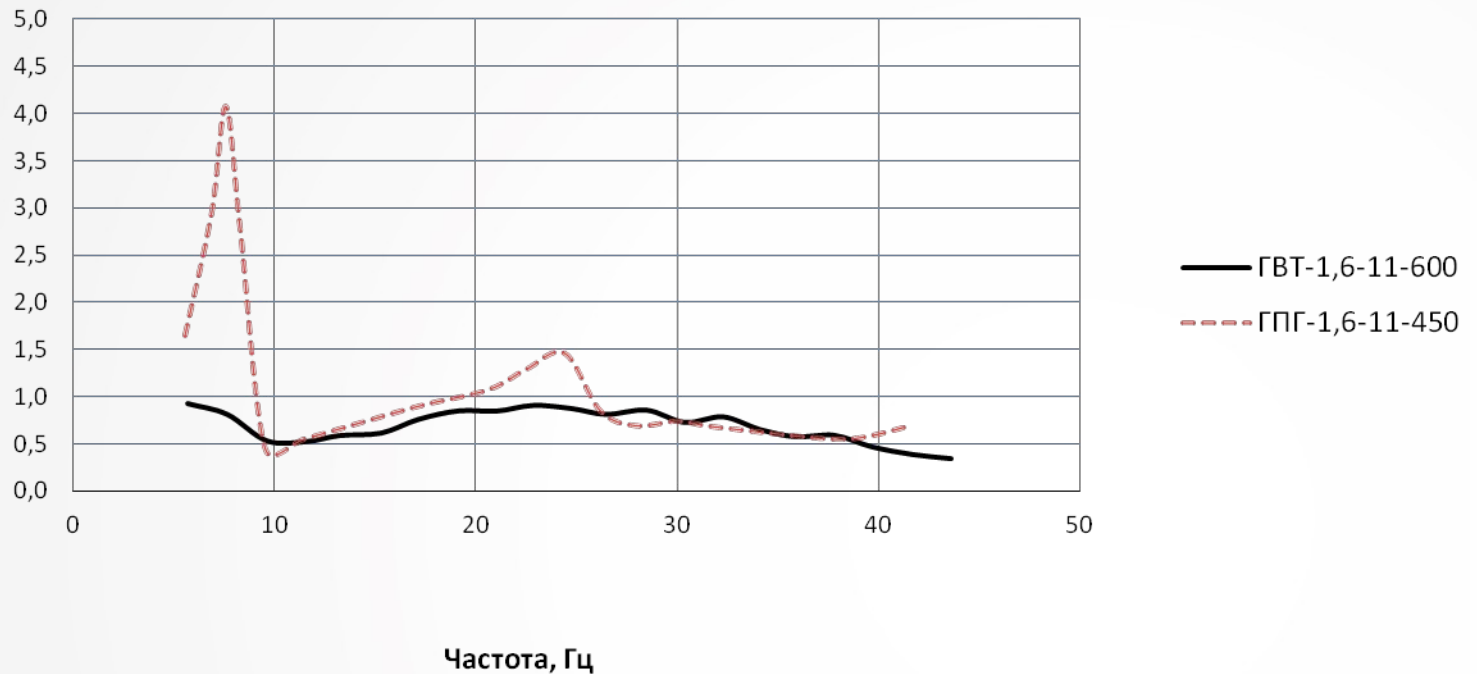


Максимальные изгибные напряжения в сечениях провода АС 150/24 с гасителями ГВТ-1,6-11-800, ГПГ-1,6-11-450 и без них



Коэффициенты эффективности работы на проводе АС 150/24 гасителей вибрации ГВТ-1,6-11-600 и ГПГ-1,6-11-450

Коэффициент эффективности работы гасителя на
проводе АС 150/24



Выводы:

- - гасители вибрации не защищают или недостаточно хорошо защищают провод в опасных местах на частотах близких к собственным частотам гасителя;
- - необходимо создание гасителей вибрации не имеющих собственных частот в диапазоне частот, в котором проводу нужна защита от вибрации;
- - необходимо внести изменения в «Методические указания в части:
 - определения диапазона частот, в котором проводу нужна защита от вибрации;
 - определения рабочего диапазона частот гасителя вибрации;
 - методики выбора для конкретного провода оптимального гасителя вибрации

Литература

- 1. Правила Устройства Электроустановок (ПУЭ), издание седьмое. М., НТЦ «ЭНАС», 2003 г.
- 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. Трофимов С.В. Защита проводов воздушных линий электропередачи на входе в соединитель. - Электрические станции, 2003, № 11.
- 4. Трофимов С.В. Оценка эффективности протектора, устанавливаемого для защиты провода на выходе из поддерживающего зажима. – Электрические станции, 2004, № 2.
- 5. Трофимов С.В. Оценка эффективности работы гасителя вибрации на проводе. – Электрические станции, 2004, № 5.
- 6. Стандарт МЭК 61897:1998. Воздушные линии – Требования к гасителям эоловой вибрации Стокбриджа и их испытания.
- 7. Бабаков И.М. Теория колебаний. М.; Гос. изд-во технико-теор. литературы, 1958.
- 8. Трофимов С.В. Собственные частоты и собственные формы поперечных колебаний одиночного провода с гасителем вибрации. ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность, 2005, № 6.
- 9. Трофимов С.В. Поперечные колебания одиночного провода с гасителем вибрации. - Электричество. 2006, № 12.
- 10. Трофимов С.В. Анализ результатов расчетов и экспериментальной проверки параметров собственных форм колебаний провода АС 120/19 с гасителем вибрации ГПГ-1,6-11-450. – ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность, 2009, № 5.
- 11. Трофимов С.В. Параметры собственных форм колебаний провода АС 120/19 с гасителем вибрации ГПГ-1,6-11-450. - Электричество. 2010, № 3.
- 12. Патент России № 116 704 на полезную модель «Гаситель колебаний провода и воздушная линия электропередачи с таким гасителем. Опубликовано: 27,05.2012. Бюл. № 15 13.
- 13. Решение от 15.11.12 о выдаче патента на изобретение «Гаситель вибрации проводов» по заявке № 2011145086 с приоритетом от 08.11.2011
- *Трофимов Сергей Викторович – старший научный сотрудник Центра электротехнического оборудования ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС», г. Москва, тел. 926-209-69-23*



ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ