

ЭССП-НД-2025-05-22

Версия 1 от 22 мая 2024

Воздушные линии – Защита от эоловой вибрации

Колосов С.В. *Dr. ing. sc.*

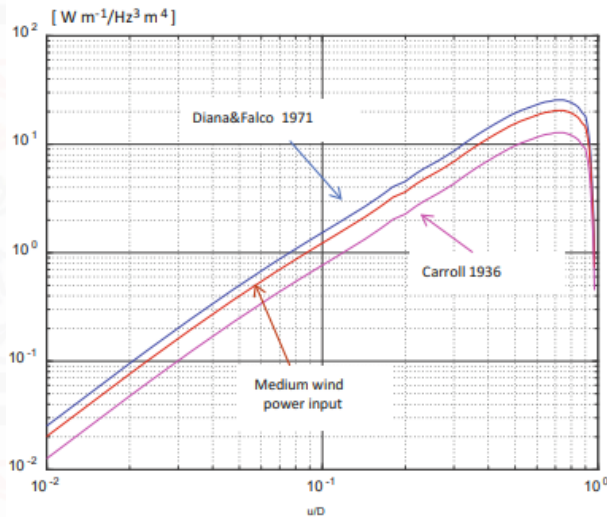
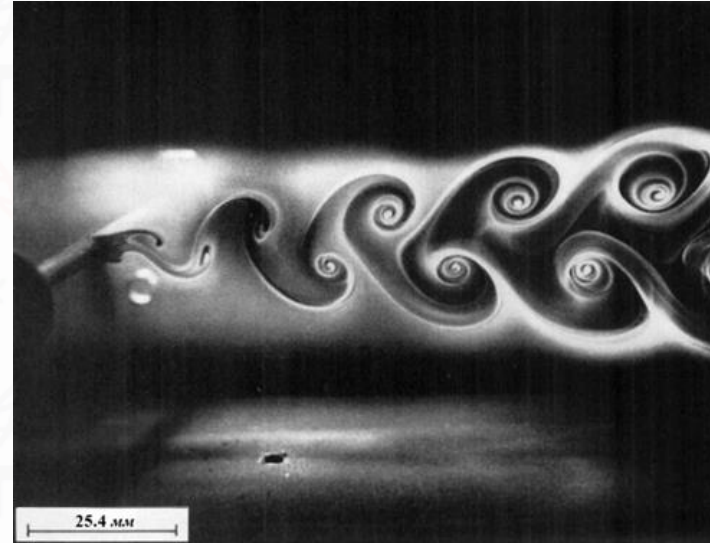
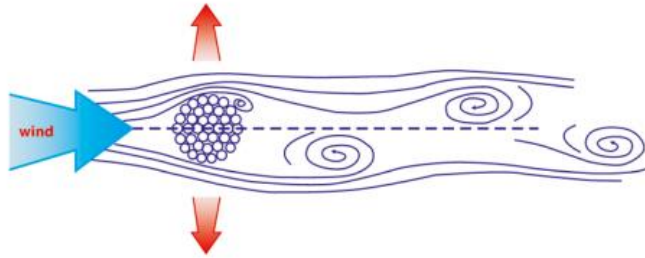
**Москва
2025**

Содержание

стр.

1 Эолова вибрация	3
2 Последствия эоловой вибрации	4
3 Развитие повреждений	5
4 Статистика повреждений	6
5 Методика CIGRE защиты от вибрации	7
6 Методика EPRI защиты от вибрации	8
7 Методика IEEE защиты от вибрации	8
8 Методика IEC защиты от вибрации	8
9 Требования ПУЭ	9
10 Требования ГОСТ	10
11 Технические требования ЭССП по защите от вибрации	11
12 Напряжения в профилированных проволоках спиралей	12
13 Вибрационная нагрузка	13
14 Карты районирования РФ по вибрационной нагрузке	14
15 Выводы	15
16 Литература	16

Эолова вибрация

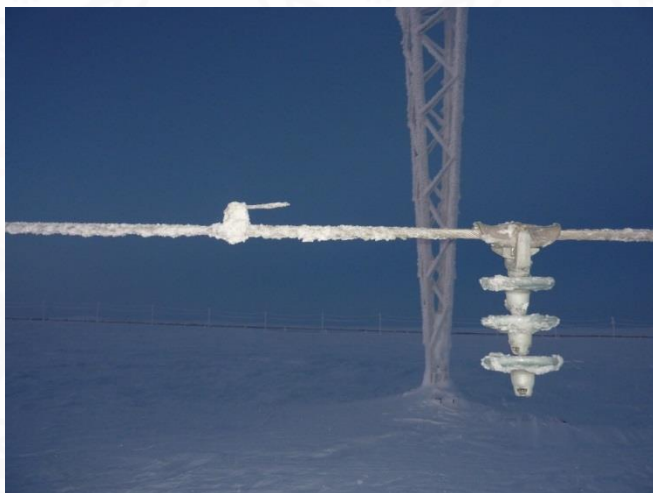


$$P_W = f^3 D^4 fnc \left(\frac{A}{D} \right)$$

$$P_W \sim 1 - 10 \text{ Вт.}$$

-
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8
- 9
- 10
- 11
- 12
- 13
- 14
- 15
- 16

Последствия эоловой вибрации



□

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

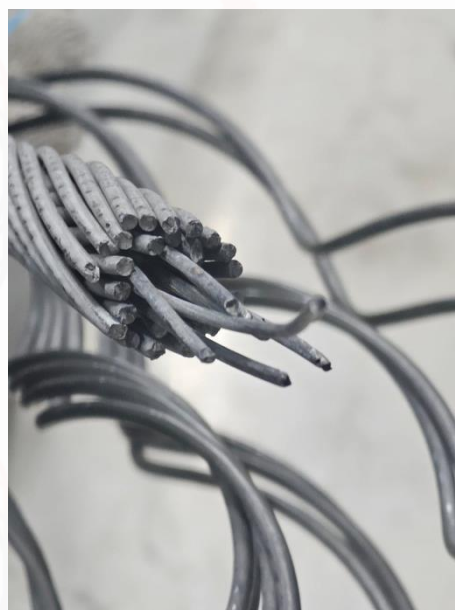
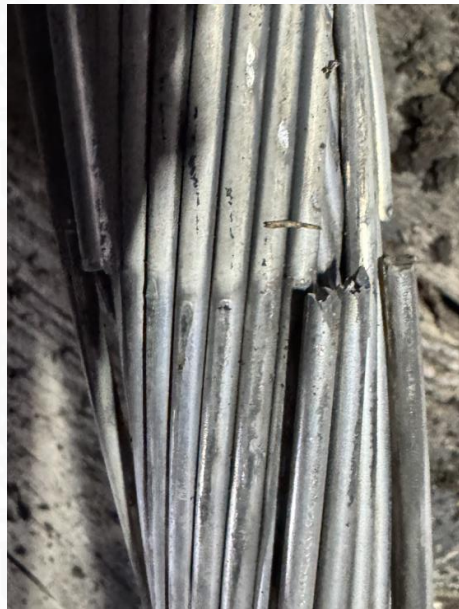
14

15

16

■

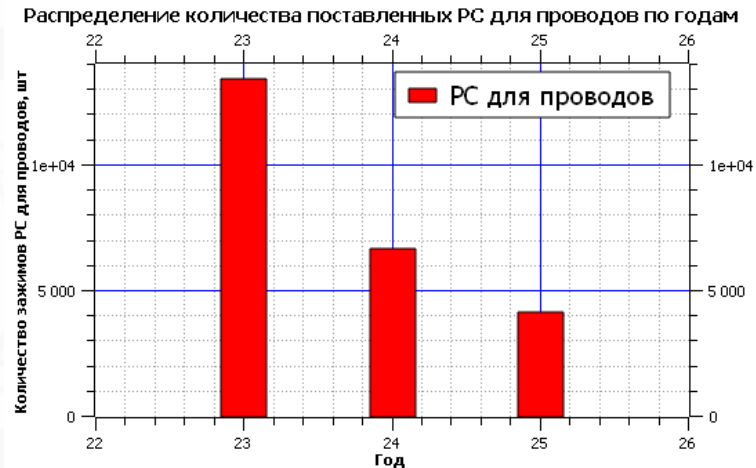
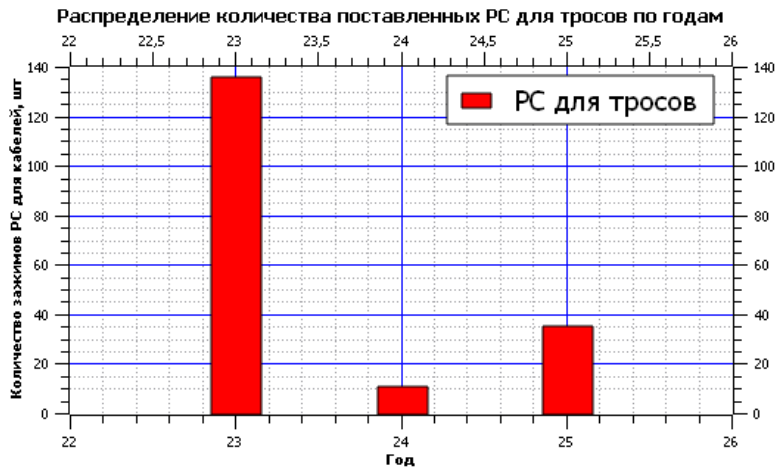
Развитие повреждений проволок при эоловой вибрации



-
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8
- 9
- 10
- 11
- 12
- 13
- 14
- 15
- 16
-

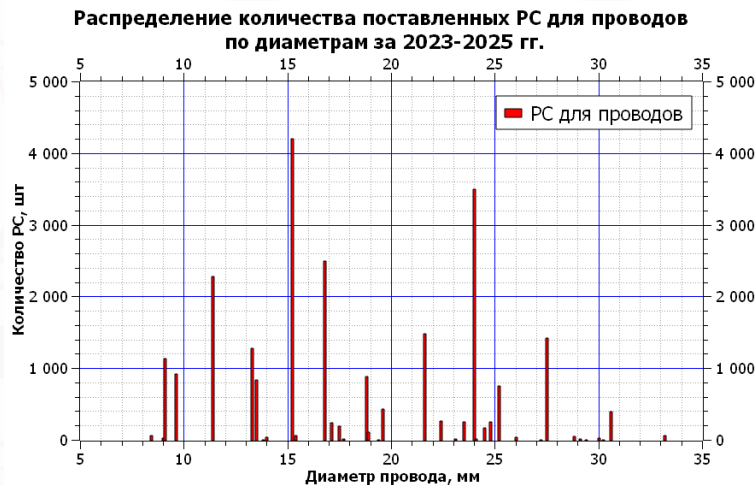


Статистика повреждений от эоловой вибрации по поставкам РС



Всего поставлено ремонтных зажимов за 2023-2025 гг.:

$$\sum_{PC} = 24153 \text{ шт.}$$



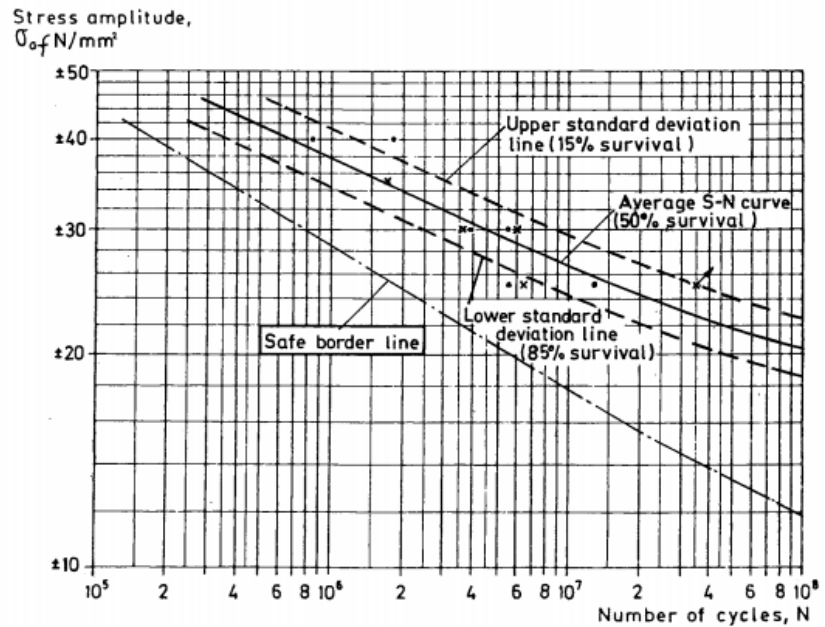
Использованы данные

Шкапцов А.В., Колосов С.В., Тищенко А.В. Анализ статистики поставок ремонтных зажимов РС, Воздушные линии, №5 Август 2025 г.



Методика CIGRE защиты от вибрации, $\sigma < \sigma_{\text{критическое}}$

Метод CIGRE WG 22-04 расчета срока службы алюминиевых и сталеалюминевых проводов основан на кумулятивном эффекте - накоплении усталостных повреждений из-за вибрации. Для этой цели амплитуда вибрации провода преобразуется в величину напряжения. По величине напряжения рассчитывается количество циклов, которое провод может провести без разрушений. Данные зависимости количества допустимых циклов от величины напряжения представлены «кривой безопасности» или «S-N кривой». Количество циклов без разрушений должно быть сопоставлено с частотой и длительностью вибрации, фактически существующей на ВЛ.



$$\sigma_{0f} = 450 N^{-0,200} \quad N < 2 \cdot 10^7$$

$$\sigma_{0f} = 263 N^{-0,168} \quad N > 2 \cdot 10^7$$

Методика EPRI защиты от вибрации, $\sigma < \sigma_{\text{критическое}}$

Оранжевая книга EPRI для многих проводов AC и AAAC приводит значения амплитуд и величин напряжения/растяжения, соответствующих «пределу безопасности». Также установлено, что общий предел безопасности может быть установлен на уровне 8,5 МПа для проводов из сплавов 1350 и 5005, тогда как для сплава 6201 и схожих должен составлять 5,7 МПа. Предел безопасности для других проводов и зажимов, отличных от классических, не установлен и не отражен в литературе.

Методика IEEE защиты от вибрации, $\varepsilon < \varepsilon_{\text{критическое}}$

Стандарт IEEE устанавливает для одноповивных проводов уровень предельно допустимых напряжений 22,5 МПа, а для многоповивных проводов 8,5 МПа.

Методика IEC 61897: 2020 защиты от вибрации, $\sigma < \sigma_{\text{критическое}}$

7.11.3.4 Аналитический метод

Эффективность гасителя вибрации определяется с помощью компьютерных программ, основанных на методах математического моделирования.

Критерии приемки должны учитывать рассчитанные значения амплитуды изгиба или изгибных напряжений провода. Они должны быть согласованы между покупателем и поставщиком, со ссылкой на IEEE WPM, 31TP 65-156 [9], CIGRE SC22 WG04 [12], CIGRE SC22 WG11-TF2 [13], IEEE 1368 [14] или эквивалентные публикации.

Использованы данные

Doocy, E.S., Hard, A.R., Rawlins, C.B., Ikegami, R. 1979. “Wind Induced Conductor Motion: EPRI Transmission Line Reference Book”, Electrical Power Research Institute, Palo Alto.

IEEE Std 1368™ -2006, IEEE Guide for Aeolian Vibration Field Measurements of Overhead Conductors.

IEC 61897:2020 Overhead lines - Requirements and tests for Aeolian vibration dampers.

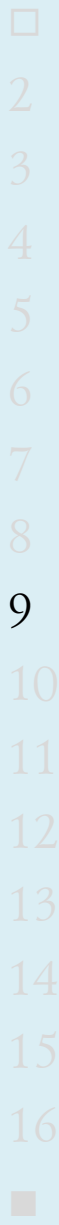


Требования ПУЭ и ГОСТ 51177-2017 и ГОСТ 51155-2017

ПУЭ-7 вводит требования по защите от эоловой вибрации. Требования отражены в пунктах 2.5.38., 2.5.85., 2.5.163., 2.5.188.

Недостатки:

- указания по защите относятся только к проводам АС по ГОСТ 839 и тросам по ГОСТ 3062, ГОСТ 3063, ГОСТ 3064;
- указания по защите новых типов проводов и грозозащитных тросов отсутствуют;
- указания по защите оптических кабелей ОКГТ, ОКСН отсутствуют;
- определение вибрационной нагрузки отсутствует, карт районирования территории РФ по вибрационной нагрузке нет;
- методика разработки Системы Защиты (какие гасители, сколько гасителей, где их размещать) отсутствует;
- критерии защищенности по всем требующим защиты объектам отсутствуют;
- методика расчета остаточного срока службы отсутствует.



Использованы данные

ПРАВИЛА УСТРОЙСТВА ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК (ПУЭ) 7 издание. 2003г.

Колосов С.В. Нормативные требования по защите ВЛ от эоловой вибрации и аномальная эффективность по ГОСТ 51177-2017 и ГОСТ 51155-2017, *ВОЗДУШНЫЕ ЛИНИИ*, №3, СТР. 22-26, ЭССП, 2023.

Требования ГОСТ 51177-2017 и ГОСТ 51155-2017 (акт. на 21.05.2025)

5.6.1.1 Эффективность работы гасителя вибрации в системе "провод-гаситель вибрации" определяют степенью снижения максимальных циклических изгибных напряжений в проволоках повивов провода в опасных его сечениях, при колебаниях системы в частотном диапазоне провода от $0,18/d$ до $1,4/d$ (d – диаметр провода, м).

5.6.1.2 Коэффициент эффективности работы гасителя вибрации, установленного на проводе, $k_{э.г}(\dot{\omega}_{п.гi})$ вычисляют на каждой собственной частоте системы "провод-гаситель вибрации" $\dot{\omega}_{п.гi}$ по формуле

$$k_{э.г}(\dot{\omega}_{п.гi}) = \frac{\sigma_{м.п.г}(\dot{\omega}_{п.гi})}{\sigma_{м.п}(\dot{\omega}_{пj})},$$

где $\sigma_{м.п.г}(\dot{\omega}_{п.гi})$ – максимальные циклические изгибные напряжения в опасном сечении провода при колебаниях системы с частотой $\dot{\omega}_{п.гi}$, равной величине i -й собственной частоты системы "провод-гаситель вибрации"; $\sigma_{м.п}(\dot{\omega}_{пj})$ – максимальные изгибные циклические напряжения в опасном сечении провода без гасителя вибрации при колебаниях с частотой $\dot{\omega}_{пj}$, равной величине j -й собственной частоты колебаний провода без гасителя, ближайшей по величине к частоте.

5.6.3.5 Эффективность работы гасителя вибрации является удовлетворительной, если значения коэффициента эффективности работы $k_{э.г}(\dot{\omega}_{п.гi}) < 0,95$. !!!

Критериев защищённости, аналогичных международным, в нормативных требованиях России нет. Результаты испытаний показали абсурдную «эффективность» по ГОСТ даже грузов без демпфирования. Из этого следует вывод: эти испытания непоказательны с точки зрения приемки гасителей, и бессмысленны с точки зрения физической логики испытаний. Методики ГОСТ противоречат теории усталости металлов, исследованиям кривой Wohler (S-N curve), а также опубликованным данным CIGRE по усталостной выносливости сталеалюминевых проводов.

Использованы данные

Колосов С.В. Нормативные требования по защите ВЛ от эоловой вибрации и аномальная эффективность по ГОСТ 51177-2017 и ГОСТ 51155-2017, Воздушные линии, №3 Август 2023 г.

Доклад Колосова С.В. на НТС Россети 18 апреля 2023 г.

Воздушные линии электропередачи – Требования к защите проводов, тросов и кабелей ВЛ от эоловой вибрации

Механические напряжения в проволоках должны быть ограничены $\sigma < \sigma_{\text{критическое}}$

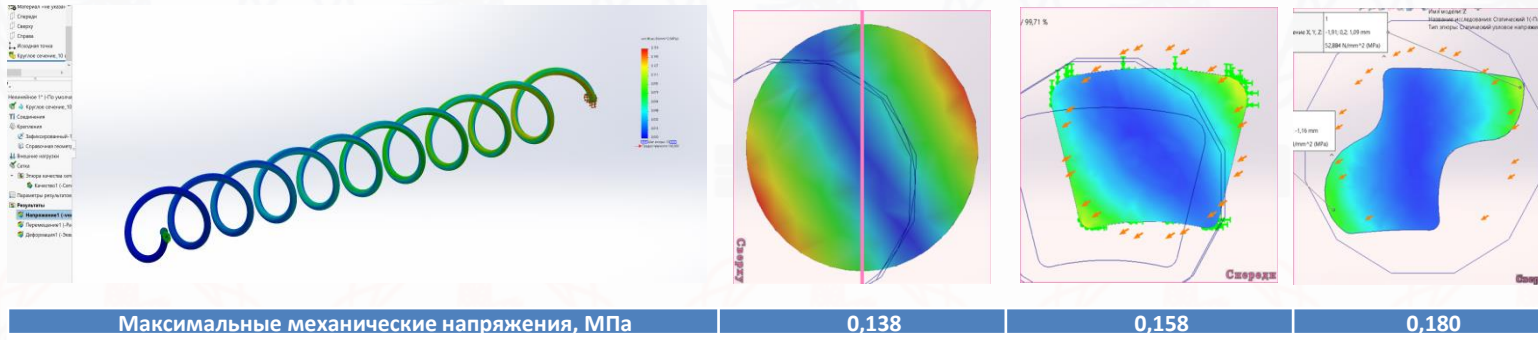
Провод, трос, кабель	$\sigma_{\text{крит}}^{\text{НВН}}$, МПа	$\sigma_{\text{крит}}^{\text{ТВН}}$, МПа	Само-демпфирование
Провод сталеалюминевый с круглыми проволоками АС (АСCR) многоповивный	8,5	4,3	Классическая модель
Провод сталеалюминевый с круглыми проволоками АС (АСCR) одноповивный	22,0	11	Ноль
Провод алюминиевый с круглыми проволоками многоповивный	8,5	4,3	Классическая модель
Провод сталеалюминевый и алюминиевый с трапецевидными проволоками	7,0	3,5	Классическая модель
Провод сталеалюминевый и алюминиевый с z-образными проволоками	5,4	2,7	Классическая модель
Провод сталеалюминевый с пластически деформированными алюминиевыми повивами	8,5	4,3	Ноль
Трос стальной ТК	192	96	Классическая модель
Трос стальной МЗ	192	96	Ноль
Трос из АС, трос ГТК	40	20	Классическая модель
ОКГТ одноповивный с центральным оптическим модулем	40 (АС)	20 (АС)	Ноль
	8,5 (АЛУ)	4,3 (АЛУ)	
ОКГТ многоповивный	40 (АС)	20 (АС)	Классическая модель
	8,5 (АЛУ)	4,3 (АЛУ)	
ОКСН	*	*	Ноль
СИП	8,5 (АЛУ)*	4,3 (АЛУ)*	Ноль

Использованы данные

СТО ЭССП Воздушные линии электропередачи – Требования к защите проводов, тросов и кабелей ВЛ от эоловой вибрации, 2025

□
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
■

Напряжения в профилированных проволоках спиралей



Расчет: Максимальные напряжения, которые развиваются в спиралях трапецевидных проволок на 14,5% выше, чем в круглых при одинаковых изгибах. Максимальные напряжения, которые развиваются в спиралях z-образных проволок на 30,4% выше, чем в круглых при одинаковых изгибах.

Испытание провода АС 240/32 из круглых проволок

В проводе АС 240/32 была установлена вибрация в частотой 35 ± 1 Гц, амплитудой 20 ± 2 мм. Испытание завершено на $9,7 \cdot 10^6$ циклов [4]. Разрушений круглых проволок вблизи прессуемого зажима НАС и вблизи спирального зажима НС не зарегистрировано. Под зажимом вибро-привода обнаружены повреждения проволок верхнего повива.

Испытание компактированного провода 240/39 из трапецевидных проволок во внешнем повиве

В компактированном проводе 240/39 была установлена вибрация 34 ± 1 Гц, 14 ± 2 мм в пучности. Разрушения трапецевидных проволок вблизи прессуемого зажима НАС зарегистрированы на $1,7 \cdot 10^6$ циклов, на $3,3 \cdot 10^6$ циклов и на $4 \cdot 10^6$ циклов [5], всего 5 проволок разрушено. Разрушений проволок вблизи спиральных зажимов НС не зарегистрировано. Под зажимом вибро-привода обнаружены повреждения проволок верхнего повива.

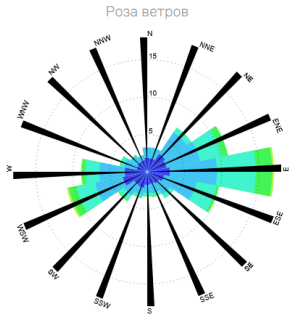
Использованы данные

Колосов С.В., Сукочев Е.В. Численные исследования механических напряжений в алюминиевых проволоках внешнего повива проводов ВЛ. *Воздушные линии*, №5 Август 2025 г.

Шкапцов А.В., Буслаев С.А., Жигулин С.В., Колосов С.В. Испытания сталеалюминиевого и компактированного провода на стойкость к вибрации со спиральной и прессуемой арматурой, *Воздушные линии*, №5 Август 2025 г.

Вибрационная нагрузка

34646. Цимлянск(Волгодонск). Зима, все годы

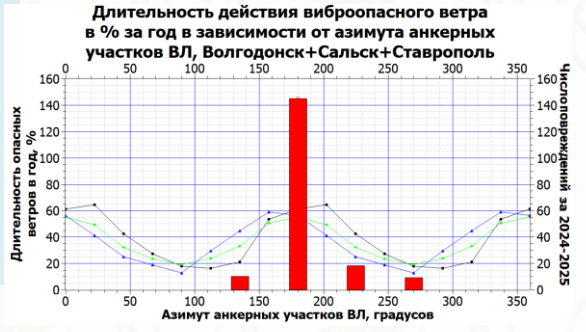
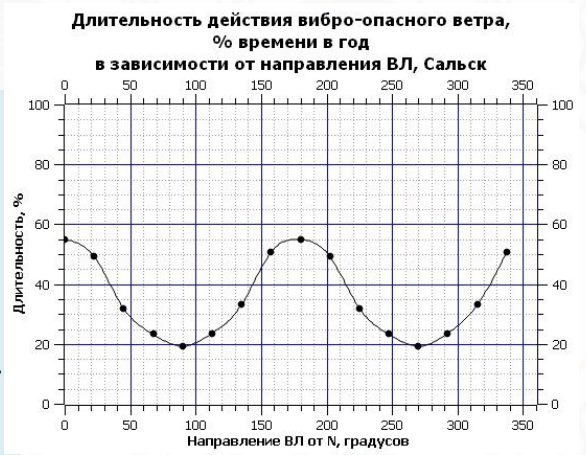


Повторяемость в %

м/с	Все румбы	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
Все скорости	3.2	3.2	7.0	10.9	16.9	9.7	4.1	3.3	3.2	4.7	10.9	8.8	3.7	2.7	2.2	
13+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11-12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9-10	0.7	-	-	-	0.3	-	-	-	-	-	0.3	0.1	-	-	-	-
7-8	5.6	-	-	-	0.9	2.2	0.4	-	0.1	0.1	0.1	0.2	1.0	0.5	0.1	0.1
5-6	19.6	0.1	0.1	0.7	3.0	5.2	2.7	0.5	0.4	0.4	0.4	0.8	2.5	1.9	0.5	0.1
3-4	39.0	1.4	1.4	3.5	4.6	6.3	4.5	1.8	1.3	1.1	1.0	1.6	3.8	3.4	1.7	1.1
1-2	33.0	1.7	1.7	2.8	2.5	2.9	2.2	1.8	1.5	1.6	2.1	2.0	3.2	2.9	1.3	1.4
штиль	2.0															
пропуски	-															

Провод АС 330/43 ВЛ 500 кВ Ростовская АЭС – Невинномысск за один год накопит от 415 до 550 миллионов циклов, а за 50 лет от 20744 до 27502 цикла. Эти накопленные циклы в 28-37 раз превосходят предусмотренные «стандартной - 8.5 МПа» защитой. Средний гарантированный безаварийный срок службы составит ~2 лет при применении защиты от вибрации при ограничении 8.5 МПа. Регион ВЛ 500 кВ Ростовская АЭС – Невинномысск следует считать особо опасным по эоловой вибрации. С учетом направления большинства пролетов ВЛ 500 кВ Ростовская АЭС – Невинномысск наихудшим по отношению к ветрам образом, следует принимать максимально допустимое механическое напряжение в верхнем повиве провода АС 330/43 от эоловой вибрации 5.2 МПа.

ВЛ 500 кВ Ростовская АЭС – Невинномысск проходит в 5-10 км от метеостанций. Наибольшее расстояние от метеостанции до пролета ВЛ составляет ~60 км.



Использованы данные

Колосов С.В., Анализ ветровой вибрационной нагрузки по метеорологическим данным на ВЛ 500 кВ Ростовская АЭС - Невинномысск. Воздушные линии, №5 Август 2025 г.

-
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8
- 9
- 10
- 11
- 12
- 13
- 14
- 15
- 16

Карта районирования



Триангуляция территории о. Сахалин по метеорологическим станциям



Использованы данные

Колосов С.В., Сукочев Е.В. Численные исследования механических напряжений в алюминиевых проволоках внешнего повива проводов ВЛ. *Воздушные линии*, №5 Август 2025 г.
 СТО ЭССП Методика расчета ветровой вибрационной нагрузки. 2025.

-
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8
- 9
- 10
- 11
- 12
- 13
- 14
- 15
- 16

Выводы

- 1) Эоловая вибрация возникает на всех линейных протяженных объектах в ветровом потоке.
- 2) Эоловая вибрация приводит к разрушению алюминиевых проволок проводов, причем с нарастающей скоростью при накоплении циклов вибрации. На территории РФ происходят оценочно десятки тысяч повреждений в год по причине эоловой вибрации.
- 3) Механические напряжения прямо пропорциональны амплитуде эоловой вибрации. Амплитуда эоловой вибрации зависит от свойств объекта и системы демпфирования. В частности от структуры провода и марки гасителя вибрации.
- 4) Зависимость срока службы (количества циклов) от механических напряжений определена для сталеалюминевых проводов – кривая безопасности. Критерий защищенности – ограничение механических напряжений в проводе.
- 6) Длительность действия вибрации – до 70% времени в год (Элиста). Количество циклов вибрации, которое накопит провод за один год зависит от метеорологической обстановки и может варьироваться от 10^6 до $1000 * 10^6$ циклов за год.
- 7) Предельно допустимые напряжения различны для различной вибрационной нагрузки и могут меняться от 4 МПа для самых сложных районов до 8,5 МПа для невысокой вибрационной нагрузки.
- 8) Разработан СТО ЭССП Требования по защите проводов, тросов и кабелей от эоловой вибрации.
- 9) Разработан СТО ЭССП Методика расчета ветровой вибрационной нагрузки.

Литература

- [1] CIGRE B2 Overhead Lines Green Book
- [2] CIGRE B2 Modelling of Vibrations of Overhead Line Conductors Green Book
- [3] Архив рекомендаций отдела Линейной арматуры НТЦ Электросети
- [4] Шкапцов А.В., Колосов С.В., Тищенко А.В. Анализ статистики поставок ремонтных зажимов РС, Воздушные линии, №5 Август 2025 г.
- [5] CIGRЙ WG 04 SC 22 – 02, 1979, Recommendations for the Evaluation of the Lifetime of Transmission, Line Conductors, Electra n. 63.
- [6] Doocy, E.S., Hard, A.R., Rawlins, C.B., Ikegami, R. 1979. “Wind Induced Conductor Motion: EPRI Transmission Line Reference Book”, Electrical Power Research Institute, Palo Alto.
- [7] IEEE Std 1368™ -2006, IEEE Guide for Aeolian Vibration Field Measurements of Overhead Conductors.
- [8] IEC 61897:2020 Overhead lines - Requirements and tests for Aeolian vibration dampers.
- [9] ПРАВИЛА УСТРОЙСТВА ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК (ПУЭ) 7 издание. 2003г.
- [10] Колосов С.В. Нормативные требования по защите ВЛ от эоловой вибрации и аномальная эффективность по ГОСТ 51177-2017 и ГОСТ 51155-2017, *Воздушные линии* №3, 2023.
- [11] ГОСТ 51155-2017 АРМАТУРА ЛИНЕЙНАЯ. Правила приемки и методы испытаний.
- [12] ГОСТ 51177-2017 АРМАТУРА ЛИНЕЙНАЯ. Общие технические требования.
- [13] СТО ЭССП Воздушные линии электропередачи – Требования к защите проводов, тросов и кабелей ВЛ от эоловой вибрации, 2025
- [14] Колосов С.В., Сукочев Е.В Численные исследования механических напряжений в алюминиевых проволоках внешнего повива проводов ВЛ. *Воздушные линии*, №5 Август 2025 г.
- [15] Шкапцов А.В., Буслаев С.А., Жигулин С.В., Колосов С.В. Испытания сталеалюминиевого и компактированного провода на стойкость к вибрации со спиральной и прессуемой арматурой. *Воздушные линии*, №5 Август 2025 г.
- [16] Колосов С.В., Анализ ветровой вибрационной нагрузки по метеорологическим данным на ВЛ 500 кВ Ростовская АЭС - Невинномысск. *Воздушные линии*, №5 Август 2025 г.
- [17] СТО ЭССП Методика расчета ветровой вибрационной нагрузки. 2025.