

**СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ/CONSTRUCTION STRUCTURES, BUILDINGS AND STRUCTURES**DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.70.8>

EDN: FJMJFV

ДИНАМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА КОНСТРУКЦИИ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ В АВАРИЙНОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ

Научная статья

Сенькин Н.А.^{1,*}¹ ORCID : 0000-0002-7086-1960;¹ Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (senkin1952[at]yandex.ru)

Аннотация

В процессе модельных испытаний выявлены динамические эффекты при внезапном разрушении растянутого стержня в решетчатой конструкции опоры ВЛ и получен пренебрежимо малый коэффициент динамичности, не превышающий 5% от максимальных усилий в расчетных режимах. Но для аварийного режима при обрыве провода в однопроводных фазах или одного грозозащитного троса, показано, что коэффициент динамичности, назначенный 1,3 в действующих нормах «Правилах устройства электроустановок» ПУЭ-2003, следует увеличить до значения 2,0 на основании анализа результатов ретроспективных натурных исследований треста ОРГРЭС и Отделения Дальних Передач института «Энергосетьпроект» на линиях электропередачи ВЛ 400 (500) кВ в 1960–70 г.г.

Ключевые слова: воздушная линия электропередачи (ВЛ), решетчатая стальная опора, аварии, прогрессирующее обрушение, динамические нагрузки и воздействия.

DYNAMIC LOADS ON OVERHEAD POWER LINE STRUCTURES DURING EMERGENCY OPERATION

Research article

Senkin N.^{1,*}¹ ORCID : 0000-0002-7086-1960;¹ Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint-Petersburg, Russian Federation

* Corresponding author (senkin1952[at]yandex.ru)

Abstract

During model tests, dynamic effects were identified following the sudden failure of a tie member in a lattice-type steel tower support structure, and a negligible dynamic coefficient was obtained, not exceeding 5% of the maximum forces under design conditions. However, for the emergency mode involving a wire break in single-circuit phases or a single lightning protection cable, it has been shown that the dynamic coefficient, set at 1.3 in the current standards "Rules for the Installation of Electrical Installations" PUE-2003, should be increased to 2.0 based on an analysis of the results of retrospective field studies conducted by the ORGRES Trust and the Long-Distance Transmission Department of the "Energosetproekt" Institute on 400 (500) kV overhead power lines in the 1960s and 1970s.

Keywords: overhead power line (OPL), lattice-type steel tower, accidents, progressive collapse, dynamic loads and impacts.

Введение

Многие известные ученые посвятили труды свои исследованию динамической работы зданий и сооружений, в частности динамике конструкций и компонентов воздушных линий электропередачи (ВЛ), а именно профессора и инженеры (В.Г. Шухов, Н.Н. Аистов [1], В.А. Труль [2], К.И. Шенфер и А.А. Глазунов [3], Н.П. Виноградов [4], А.Х. Хохарин [5], Н.К. Снитко [6], К.П. Крюков [7], Л.В. Яковлев [8], Е.В. Горохов [9], А.А. Зевин [10], Ю.Р. Гунгер, А.Д. Бошнякович, Е.В. Шевченко [11], С.В. Крылов [12], Л.В. Тимашова [13], С.В. Колосов, А.В. Тищенко, А.А. Виноградов, Ю.Л. Цветков, В.А. Кравченко, В.Е. Сюксин [14], И.М. Галиаскаров [15], А.В. Танасогло [16], Ф.Л. Коган, Р.С. Каверина [17], Л.И. Качановская, П.И. Романов [18], В.В. Мищенко [19] и другие исследователи [20], [23], [27], [30]). В докторской диссертации профессор Ленинградского инженерно-строительного института (ЛИСИ, сейчас СПбГАСУ) В.А. Труль определил ряд задач для исследователей в области действительной работы конструкций ВЛ: «обрыв провода создает динамическую нагрузку на опоры. Наиболее существенной является нагрузка аварийного тяжения. Решение задачи увеличения долговечности связано с изучением динамической работы конструкций с обследованием вибраций на действующих линиях» [2].

Актуальность статьи обусловлена значительной протяженностью отечественных ВЛ, составляющей более 2,5 млн км в составе ПАО «Россети» для разных классов напряжений 0,4–750 кВ, а также их неудовлетворительным техническим состоянием и высокой аварийностью. Задача анализа действительной работы конструкций имеет высокий уровень новизны и актуальности в связи с выявлением новых фактов аварийных повреждений и динамических воздействий на конструкции. Согласно п. 5.6 СП 20.13330.2016, при проектировании сооружения следует выполнять расчеты на особые нагрузки и воздействия (сейсмические, взрывные, ударные — например, от наезда транспортных средств с опорами ВЛ, аварийные в «аварийном режиме» — например, обрыв провода или

грозозащитного троса, взрыв, столкновение транспортных средств с частями сооружений, авария оборудования, пожар, землетрясение, некоторые климатические нагрузки, отказ работы несущего элемента конструкций), создающие аварийные ситуации с возможными катастрофическими последствиями.

В соответствии с п.п. 6.1.2 ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований» (с изм. №1) «динамические воздействия допускается приводить к эквивалентным статическим нагрузкам за счет введения соответствующих коэффициентов динамичности, учитывающих возникающие в сооружениях силы инерции». Поэтому главной задачей данной публикации является оценка динамических воздействий на опоры в аварийном режиме работы ВЛ с определением коэффициентов динамичности в условиях прогрессирующего обрушения конструкций.

Методы исследования: аварии и прогрессирующее обрушение

Доклад по данной теме «Аварии и прогрессирующее обрушение конструкций воздушных линий электропередачи» был представлен автором на IX Международном симпозиуме «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений», проведенного в ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства» 21–24 мая 2025 г. [20].

В авторских статьях [24], [25], [26], [27] приведены результаты исследований реальных аварийных ситуаций на ВЛ. Здесь исследуются два уровня последовательно возникающих аварийных ситуаций, приводящих к прогрессирующему обрушению конструкций: первый, относящийся к локальному повреждению элементов несущей конструкции опоры, который может привести к прогрессирующему обрушению первого рода (ПО-1), и второй — второго рода (ПО-2) - к массовому разрушению и падению групп опор на участках линейной цепи, когда разрыв «слабого звена» — падение даже одной опоры может привести к коллапсу всей цепи посредством значительных усилий в проводах, особенно в грозозащитных тросах [24].

В мае 2022 года в Механической лаборатории СПбГАСУ им. профессора Н. Н. Аистова проведены испытания восьми стальных стержней на разрывной машине INSTRON (США) мощностью 600 кН (рис. 1, а). Здесь внезапное разрушение растянутого стержня в конструкции ВЛ, сопровождаемое ударом, имитировалось посредством разрыва стержня в месте ослабленного сечения (у нижнего захвата машины), которое инициировалось пропилами на глубины $\delta=0,5, 1,0, 1,5$ и $2,0$ мм с двух сторон сечения стержней. Каждый испытуемый образец представлял собой стальной прокатный стержень квадратного сечения 6×6 мм, длиной 500 мм, установленный в первичную О-образную схему испытательной установки. Вторичная С-образная более статически определимая схема испытательной установки образуется после разрушения образцов в нижней части и выхода из первичной схемы.

На рис. 1, б представлен график динамических эффектов, включающий три основные фазы нагружения стержня во времени t : I — нарастание нагрузки T с усилием растяжения в стержне первичной схемы N от начального N_0 (точка 1) до максимального значения N_{max} (т.2), с разрушением стержня (т.3) по причине достижения предела текучести σ_t , а затем — временного сопротивления σ_b ; II — образование вторичной схемы, нагруженной силой F обратного знака вдоль разрушенного стержня при его обрыве в т.3.

При этом сжимающее усилие N_b стержне почти мгновенно снижается от т.3 до т.4, а затем - до нуля и даже до отрицательных значений N_{min} (т.5). Фаза III — затухающие колебания относительно горизонтальной оси от т.4 с начальной амплитудой N_{min} с затуханием усилий в оставшейся части стержня до статического $P = P_1 = P_2 = 0,582$ кН. Выражение для силы $F = -(N_{max} + N_{din})$, действующей во вторичной схеме, составлено из силовых параметров, имеющих разновременный характер, поэтому не является корректным: максимальное значение усилия N_{max} возникает в момент разрыва, а динамическое - в момент перескока с ударом $N_{din} = P - N_{min}$. Действительно, в результате модельного эксперимента были выявлены динамические эффекты незначительной интенсивности (см. таблицу 1).

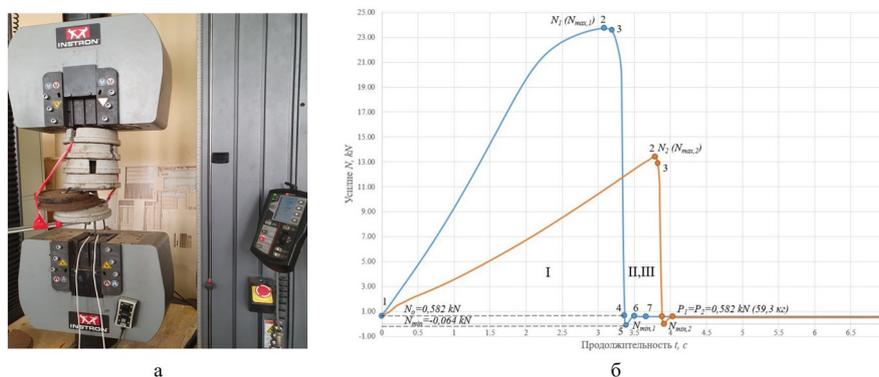


Рисунок 1 - Испытания на растяжение до разрушения стержня, нагруженного дополнительной весовой нагрузкой P по его длине, имитирующей его собственный погонный вес:

а – испытательная установка; б – график усилия N во времени t , построенный графопостроителем машины, для двух независимых испытаний №1 и №2 двух стержней при одинаковой весовой нагрузке $P=0,582$ кН или 59,3 кг, составленной грузами

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.70.8.1>

Таблица 1 - Расчет показателей динамичности d из экспериментов №№ 1-8DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.70.8.2>

№ п/п	Параметры			Усилия в стержне, Н						Показатель динамичности d
	P , кг	δ , мм	A_n , мм ²	N_0	$N_2 (N_{max})$	$N_5 (N_{min})$	N_6	N_7	N_{din}	
1	7,3	2,0	12	554	10807	68	71	68	3	0,0003
2	39,3	1,5	18	519	21739	-670	176	138	846	0,0389
3	17,3	1,0	24	422	16183	369	378	370	9	0,0006
4	59,3	1,0	24	670	13378	100	534	520	434	0,0324
5	54,3	2,0	12	414	9741	315	537	523	222	0,0228
6	39,3	1,5	18	459	21240	378	536	521	158	0,0074
7	54,3	0,5	30	516	23578	155	567	525	412	0,0175
8	59,3	0,5	30	699	23718	-64	576	582	644	0,0272

Так, по полученным в эксперименте усилиям по результатам испытаний 8 образцов (рис. 1 а, б) вычислен относительный показатель динамичности $d=N_{din}/N_{max}$, не превышающий 0,05 или 5%. Поэтому можно пренебречь возникающим при выключении элемента динамическим воздействием с ударом, оставив только статические результаты для инженерных расчетов.

Таким образом, при мгновенном удалении растянутого стержня усилия в нем принимаются из первичной расчетной схемы и прикладываются во вторичной схеме с обратным знаком. Аналогичный результат проявляется при разрушении сжатого стержня, который моделируется как растянутый после разрыва и удара. Этот результат соответствует методике Минстроя РФ по защите зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения [28], определяющей, что «мгновенное удаление выключаемого элемента моделируется усилиями, определенными в этом элементе в первичной расчетной схеме, прикладываемыми во вторичной расчетной схеме с обратным знаком». Для каждого оборванного стержня появляется сила, действующая на верхний узел конструкции вторичной схемы, $F=-N_{max}$, и на нижний - $F=-(N_{max}-P)$, на которые выполняется последующий расчет на ПО-1 конструкций на нагрузки среднеэксплуатационных условий аналогично расчетам в аварийном режиме [25], [26]. Такой расчет подобен расчетам по аварийному режиму при обрыве проводов и тросов при традиционном расчете опор ВЛ согласно «Правилам устройства электроустановок (ПУЭ-2003)». С целью обеспечения защиты конструкции от локального разрушения рекомендуется увеличить площадь поперечного сечения критических элементов либо установить дополнительные диафрагмы, подкрепляющие узлы пересечения основных раскосов для снижения их расчетных длин.

Основные результаты: анализ динамических воздействий на конструкции в аварийном режиме работы ВЛ в натуральных условиях

Более точные результаты, наиболее отвечающие действительной работе сооружения, соответствуют условиям динамической работы проводов, грозозащитных тросов и конструкции ВЛ в аварийном режиме работы, предваряющему возможное наступление ПО-2 [27]. В 1960-70 годах трест «ОРГРЭС» (А.Х. Хохарин) [5] и Отделение Дальних Передач (ОДП) «Энергосетьпроект» (А.С. Зеличенко, Е.А. Хволес, Н.В. Чаплина) [29] провели натурные испытания опытного участка ВЛ 400 кВ длиной 4,3 км на полигоне треста в г. Хотьково Московской области, специально построенного для исследования динамической работы проводов и конструкций опор. Испытывались стальные порталные опоры на оттяжках типов ПО и ПО-МП (см. рисунки 2 и 3) и были получены следующие результаты (см. таблицу 2).

В местах прикрепления гирлянд изоляторов к траверсе испытываемых опор и крепления оттяжек к фундаментам были установлены электронные динамометры с разверткой усилий в оттяжках и подвесках гирлянд во времени на осциллографе. Замеры отклонений гирлянд от вертикали во времени выполнялись теодолитом с постоянной записью на высокоточную кинокамеру. На рис. 3 представлен график усилий в оттяжках при аварийном одновременном обрыве проводов средней фазы на испытаниях опоры типа ПО на опытной ВЛ 400 (500) кВ на полигоне у г. Хотьково (А.Х. Хохарин, 1958) [5], на который нанесен пунктир усилий при статическом воздействии в успокоившемся положении проводов и оттяжек (см. рисунок 3).



Рисунок 2 - Промежуточная стальная опора на оттяжках типа ПО для ВЛ 220 кВ в габаритах 500 кВ, демонтируемая тяжелым вертолетом МИ-6 после повреждения по причине оползня с перемещением левой ноги опоры с заменой на стальную промежуточную опору Р-2 ВЛ 500 кВ
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.70.8.3>

Таблица 2 - Усилия тяжения в оттяжках в аварийном режиме: вынужденный обрыв проводов фазы в натуральных испытаниях

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.70.8.4>

Опора	Фаза	Вид нагрузки	Усилия тяжения в проводах фазы, кН и коэффициенты динамичности d_0				
			опора типа ПО		опора типа ПО-МП		средне-арифметическое
№ 1	крайняя	динамика	6850	1,89	7000	2,54	
		статика	3620		2760		
№ 2	средняя	динамика	12700	1,72	9800	2,55	
		статика	7380		3840		

Примечание: по ист. [29]

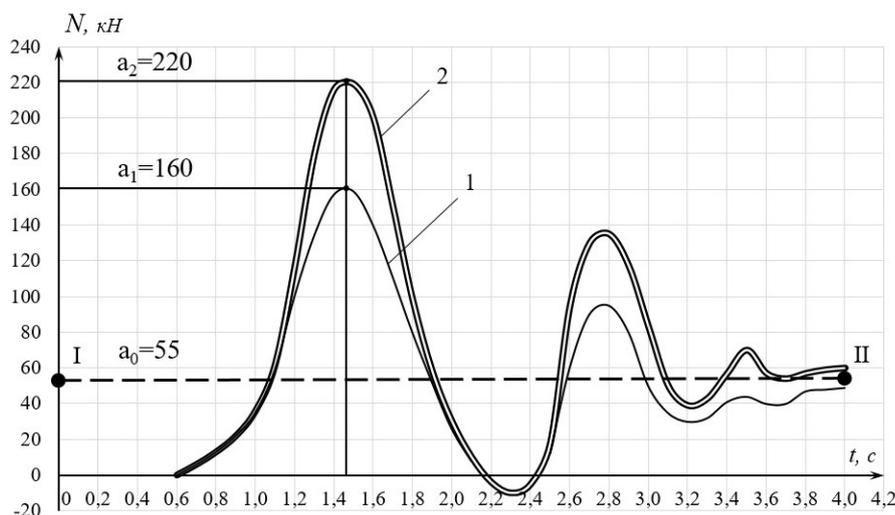


Рисунок 3 - Динамический график усилий в двух предварительно-напряженных оттяжках при одновременном обрыве проводов средней фазы

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.70.8.5>

Примечание: по ист. [5]

По рисунку 3 коэффициент динамичности для 1-ой оттяжки равен $d_0 = (160-55)/55 = 1,91$, для второй оттяжки $d_0 = (220-55)/55 = 3,00$, а среднеарифметическое значение в этих оттяжках — $d_0 = 2,45$.

Таким образом, результаты натурных экспериментов, проведенных в ОРГРЭС, свидетельствуют, что в аварийном режиме при одновременном обрыве всех трех проводов одной фазы для ВЛ 500 кВ возникает динамический коэффициент, составляющий 2,0-2,5 в соответствии с вышеприведенными значениями. Однако, в связи с реальным неодновременным обрывом трех проводов фазы на опоре ВЛ 400 (500) ОДП «Энергосетьпроект» в те годы предложил понизить динамический коэффициент в $k = 2-2,5$ раза (в среднем в 2,25 раза) [29], который при этом в среднеарифметическом значении составил $(2,45+2,175)/2 \cdot 2,25 = 1,03$. Поэтому в ПУЭ прошлого века и в действующих нормах ПУЭ-7 назначен динамический коэффициент $d_0 = 1,3$ на усилия при обрыве проводов фазы, который можно считать подтвержденным и оставить без изменения для расцепленной фазы, состоящей из 2-5 проводов для ВЛ 330-750 кВ. Но для однопроводных фаз для ВЛ 35-220 кВ коэффициент k применять не следует, тогда при расчете воздействия на опору одиночного провода либо грозозащитного троса автором рекомендуется применение в расчетах динамического коэффициента $d_0 = 2$.

Этот результат подтверждается расчетами академика А.Н. Крылова в области колебаний механических систем [30], в частности для продольных и поперечных колебаний стержней и струн, описываемых «волновым уравнением» второго порядка в частных производных. В его книге «Вибрация судов» в §55 главы 6 «Продольные и крутильные колебания стержней» представлены результаты упругого расчета цилиндра прибора Уатта (индикатор давления газа) как растянутого длинного стержня при внезапном приложении силы (давления), которые показывают, что динамическое давление в цилиндре составило «вдвое больше статического сжатия. Этот результат относится к любой упругой системе: наибольшая деформация, производимая усилием, внезапно приложенным, вдвое больше деформации, соответствующей равновесию под действием того же усилия» [30]. Следовательно, данный результат свидетельствует о наличии коэффициента динамичности $d_0 = 2$, при внезапном приложении силы к цилиндрическому длинному стержню, например к орудийному стволу при выстреле. Кроме того, коэффициент динамичности $d_0 = 2$ при обрыве провода или троса почти подтверждается в украинских нормах ПУЭ, составив 1,9 [16].

Таким образом, на основе анализа ретроспективных исследований, полученных другими авторами, получены приемлемые для проектирования коэффициенты динамичности, подтвержденные результатами натурных испытаний и расчетами.

Заключение

1. Подтверждено расчетами и результатами модельных и натурных испытаний, что учет динамических воздействий на ВЛ наиболее точно отвечает действительной работе конструкций, обеспечивая соответствие расчетных усилий действительным, а их воздействия при проектировании учитываются коэффициентами динамичности согласно ГОСТ 27751-2014 (с изм. №1).

2. Выполнены модельные испытания, показавшие динамические эффекты при внезапном разрушении растянутого стержня в решетчатой конструкции опоры ВЛ, однако коэффициент динамичности оказался пренебрежимо мал, составляя меньше 5%.

3. На основе анализа результатов ретроспективных натурных экспериментов, проведенных в 1960-70 годах трестом ОРГРЭС и ОДП института «Энергосетьпроект» на линиях электропередачи ВЛ 500 кВ, в расчетах конструкций для аварийного режима при обрыве провода в однопроводных фазах или одного грозозащитного троса автор предлагает назначить коэффициент динамичности 2,0 вместо коэффициента 1,3 в действующих нормах ПУЭ-2003.

**Конфликт интересов**

Не указан.

Рецензия

Гарькин И.Н., Российский университет дружбы народов
им. Патриса Лумумбы, Пенза Российская Федерация
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.70.8.6>

Conflict of Interest

None declared.

Review

Garkin I.N., FGAOU VO Peoples' Friendship University of
Russia named after Patrice Lumumba, Penza Russian
Federation
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.70.8.6>

Список литературы / References

1. Аистов Н.Н. Научно-исследовательская работа кафедры металлических конструкций и испытания сооружений / Н.Н. Аистов // Металлические конструкции и испытания сооружений: сб. науч. трудов ЛИСИ. — 1963. — Вып. 40. — С. 7–9.
2. Труль В.А. Исследование действительной работы конструкций опор воздушных линий электропередачи: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Труль Владимир Антонович. — Ленинград: ЛИСИ, 1966. — 43 с.
3. Глазунов А.А. Работа и расчет проводов и тросов / А.А. Глазунов. — Москва: Госэнергоиздат, 1956. — 192 с.
4. Виноградов Н.П. Опоры для линий электропередачи напряжением 400 кВ и выше: Вопросы электропередачи больших мощностей на большие расстояния / Н.П. Виноградов // Труды 1 Всесоюзной конференции по электропередаче больших мощностей на большие расстояния токами сверхвысоких напряжений (Ленинград 25-30.04.1931). — Ленинград; Москва: Госэнергоиздат, 1932. — С. 451–467.
5. Хохарин А.Х. Экспериментальное исследование работы предварительно напряженной стальной конструкции опоры ЛЭП 400 кВ / А.Х. Хохарин // Промышленное строительство. — 1959. — № 5. — С. 40–44.
6. Снитко Н.К. О динамическом расчете высокой башни переменного сечения / Н.К. Снитко // Строительная механика и расчет сооружений. — 1973. — № 4 — С. 33–35.
7. Крюков К.П. Конструкции и расчет металлических и железобетонных опор линий электропередачи / К.П. Крюков, А.И. Курносов, Б.П. Новгородцев. — Ленинград: Энергия, 1975. — 456 с.
8. Яковлев Л.В. Комплекс работ и предложений по повышению надежности ВЛ на стадии проектирования и эксплуатации / Л.В. Яковлев, Р.С. Каверина, Л.А. Дубинич // Линии электропередачи 2008: проектирование, строительство, опыт эксплуатации и НТП. — Новосибирск, 2008. — С. 28–49.
9. Зевин А.А. Метод расчета вантово-стержневых систем / А.А. Зевин // Прогрессивные решения в электросетевом строительстве: сб. научн. тр. — Ленинград: Энергосетьпроект, 1988. — С. 22–31.
10. Горохов Е.В. Повышение надежности и долговечности электросетевых конструкций: монография ДонНАСА / Е.В. Горохов, С.Н. Шаповалов, Е.И. Удод [и др.]; под ред. Е.В. Горохова. — Киев: Техніка, 1997. — 284 с.
11. Шевченко Е.В. Определение редуцированного тяжения при обрыве провода / Е.В. Шевченко, В.А. Митраков, А.В. Танасогло // Металлические конструкции. — Т. 16. — № 3. — 2010. — С. 189–198.
12. Крылов С.В. Испытания поддерживающих зажимов в динамическом режиме обрыва проводов фазы ВЛ / С.В. Крылов // Материалы 2-го научно-технического семинара «Проблемы механики ВЛ, климатические условия, нагрузки и воздействия, колебания проводов и методы их ограничения». — Москва: ВНИИЭ, 2004. — С. 1–20.
13. Тимашова Л.В. Повышение надежности воздушных линий электропередачи и оптимизация их проектирования при применении проводов нового поколения / Л.В. Тимашова, И.А. Никифоров, С.В. Колосов и др. // CIGRE. Доклад B2-205. — 2014. — 12 с.
14. Колосов С.В. Повышение пропускной способности ВЛ: анализ технических решений / С.В. Колосов, С.В. Рыжов, В.Е. Сюзин // Опыт, устремленный в будущее. — Москва: Электросетьстройпроект, 2013. — С. 26–36.
15. Galiaskarov I.M. Once again about the cyclicity of accidents in the main networks of power systems / I.M. Galiaskarov, M.Sh. Misrikhanov, V.N. Ryabchenko // Electricity. — 2019. — № 11. — P. 4–11. — DOI: 10/24150/0013-5380-2019-11-4-11.
16. Танасогло А.В. Теоретические исследования напряженно-деформированного состояния промежуточных высоковольтных опор при действии нагрузок от обрывов проводов / А.В. Танасогло, И.М. Гаранжа, С.Н. Мишура // Современное строительство и архитектура. — 2016. — № 2 (02). — С. 23–26.
17. Качановская Л.И. Проектирование больших переходов через водные преграды с применением высокотемпературных проводов / Л.И. Качановская, П.И. Романов, Е.Д. Константинова [и др.] // Электроэнергия: передача и распределение. — 2013. — № 1 (16). — С. 54–56.
18. Коган Ф.Л. Дефектоскопия проводов и грозозащитных тросов воздушных линий электропередачи / Ф.Л. Коган, Р.С. Каверина, С.В. Хоменко [и др.] // Энергетик. — 2002. — № 9. — С. 22–24.
19. Мищенко В.В. Монтаж проводов гибких связей и заходов воздушных линий электропередачи на ГЭС: проблемы проектирования и способы их решения / В.В. Мищенко // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. — 2022. — Т. 306. — С. 61–70.
20. Ошеров Б.Л. Испытания промежуточных опор динамическими нагрузками / Б.Л. Ошеров // Электрические станции. — 1974. — № 11. — С. 15–19. [in Russian]
21. Travush V.I. Survivability of structural systems of buildings with special effects / V.I. Travush, N.V. Fedorova // Engineering and Construction Journal. — 2018. — № 5. — P. 73–80. — DOI: 10.18720/MCE.81.8.



22. Колчунов В.И. Живучесть зданий и сооружений при запроектных воздействиях / В.И. Колчунов, Н.В. Ключева, Н.Б. Андросова [и др.]. — Москва: Издательство АСВ, 2014. — 208 с.
23. Колчунов В.И. Живучесть конструктивных систем зданий и сооружений: аналитический обзор исследований / В.И. Колчунов, Т.А. Ильющенко, Н.В. Федорова [и др.] // Строительство и реконструкция. — 2024. — № 3 (113). — С. 31–71. — DOI: 10.33979/2073-7416-2024-113-3-31-71.
24. Сенькин Н.А. Аварии и прогрессирующее обрушение конструкций воздушных линий электропередачи / Н.А. Сенькин // Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений»: тезисы докладов IX Международного симпозиума / Пензенский государственный университет архитектуры и строительства. — Пенза: Изд-во ПГУ, 2025. — С. 106–107.
25. Сенькин Н.А. Прогессирующее обрушение и восстановление конструкций воздушных линий электропередачи / Н.А. Сенькин // Известия вузов. Строительство. — 2023. — № 10. — С. 5–20. — DOI: 10.32683/0536-1052-2023-778-10-5-20.
26. Сенькин Н.А. Учет прогрессирующего обрушения при проектировании опор воздушных линий электропередачи / Н.А. Сенькин // Вестник гражданских инженеров. — 2022. — № 4 (93). — С. 37–46. — DOI: 10.23968/1999-5571-2022-19-4-37-46.
27. Сенькин Н.А. Действительная работа стальных конструкций воздушных линий электропередачи напряжением 35 кВ и выше / Н.А. Сенькин, Т.Е. Белякова, Д.А. Мальчиков [и др.] // Металлические конструкции. — ДонНАСА, 2022. — Т. 28. — № 1. — С. 5–18.
28. Проектирование мероприятий по защите зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения: методическое пособие. — Москва: Минстрой РФ, 2018. — 158 с.
29. Зеличенко А.С. Выбор типа поддерживающих зажимов на линиях 330-750 кВ / А.С. Зеличенко, Е.А. Хволес, Н.В. Чаплина // Электрические станции. — 1970. — С. 55–59.
30. Крылов А.Н. Вибрация судов / А.Н. Крылов // Собрание трудов академика А.Н. Крылова. — Москва; Ленинград: Изд-во АН СССР, 1948. — Т. 10. — 406 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Aistov N.N. Nauchno-issledovatel'skaya rabota kafedri metallicheskih konstruksii i ispitaniya sooruzhenii [Research work of the Department of Metal Structures and Testing of Structures] / N.N. Aistov // Metallicheskie konstruksii i ispitaniya sooruzhenii: sb. nauch. trudov LISI [Metal structures and testing of structures: collection of scientific works of LISI]. — 1963. — Iss. 40. — P. 7–9. [in Russian]
2. Trull V.A. Issledovanie deistvitel'noi raboti konstruksii opor vozdushnikh linii elektropredachi [Research of the Actual Operation of the Structures of the Supports of the Overhead Power Transmission Lines]: abstract of the dis. ... of PhD in Technical Sciences / Trull Vladimir Antonovich. — Leningrad: LISI, 1966. — 43 p. [in Russian]
3. Glazunov A.A. Rabota i raschet provodov i trosov [Working with and calculating wires and cables] / A.A. Glazunov. — Moscow: Gosenergoizdat, 1956. — 192 p. [in Russian]
4. Vinogradov N.P. Opori dlya linii elektropredachi napryazheniem 400 kV i vishe: Voprosi elektropredachi bolshikh moshchnostei na bolshie rasstoyaniya [Supports for Transmission Lines with a Voltage of 400 kV and Higher: Issues of Transmission of Large Capacities over Long Distances] / N.P. Vinogradov / Trudi 1 Vsesoyuznoi konferentsii po elektropredache bolshikh moshchnostei na bolshie rasstoyaniya tokami sverkhvisokikh napryazhenii (Leningrad 25-30.04.1931) [Proceedings of the 1st All-Union Conference on Transmission of Large Capacities over Long Distances by Ultra-High-Voltage Currents (Leningrad, 25-30 April 1931)]. — Leningrad; Moscow: Gosenergoizdat, 1932. — P. 451–467. [in Russian]
5. Khokharin A.Kh. Eksperimentalnoe issledovanie raboti predvaritel'no napryazhennoi stalnoi konstruksii opori LEP 400 kV [Experimental study of the operation of a prestressed steel structure of a 400 kV power line support] / A.Kh. Khokharin // Promishlennoe stroitel'stvo [Industrial Construction]. — 1959. — № 5. — P. 40–44. [in Russian]
6. Snitko N.K. O dinamicheskom raschete visokoi bashni peremennogo secheniya [On the dynamic calculation of a high tower with a variable cross-section] / N.K. Snitko // Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii [Construction mechanics and calculation of structures]. — 1973. — № 4 — P. 33–35. [in Russian]
7. Kryukov K.P. Konstruksii i raschet metallicheskih i zhelezobetonnykh opor linii elektropredachi [Design and calculation of metal and reinforced concrete transmission line supports] / K.P. Kryukov, A.I. Kurnosov, B.P. Novgorodtsev. — Leningrad: Energiya, 1975. — 456 p. [in Russian]
8. Yakovlev L.V. Kompleks rabot i predlozhenii po povisheniyu nadezhnosti VL na stadii proektirovaniya i ekspluatatsii [A set of works and proposals for improving the reliability of overhead lines during the design and operation stages] / L.V. Yakovlev, R.S. Kaverina, L.A. Dubinich // Linii elektropredachi 2008: proektirovanie, stroitel'stvo, opit ekspluatatsii i NTP [Transmission Lines 2008: Design, Construction, Operation Experience, and Technological Progress]. — Novosibirsk, 2008. — P. 28–49. [in Russian]
9. Zevin A.A. Metod rascheta vantovo-sterzhnevnykh sistem [Method of calculating cable-rod systems] / A.A. Zevin // Progressivnye resheniya v elektrosетevom stroitel'stve: sb. nauchn. tr [Progressive Solutions in Electrical Network Construction: Collection of Scientific Papers]. — Leningrad: Energosetproekt, 1988. — P. 22–31. [in Russian]
10. Gorokhov Ye.V. Povishenie nadezhnosti i dolgovechnosti elektrosетevnykh konstruksii: monografiya DonNASA [Improving the Reliability and Durability of Electrical Network Structures: A Monograph by DonNASA] / Ye.V. Gorokhov, S.N. Shapovalov, Ye.I. Udod [et al.]; ed. by Ye.V. Gorokhova. — Kyiv: Tekhnika, 1997. — 284 p. [in Russian]



11. Shevchenko Ye.V. Opredelenie redutsirovannogo tyazheniya pri obrive provoda [Determination of Reduced Tension in the Event of a Wire Breakage] / Ye.V. Shevchenko, V.A. Mitrakov, A.V. Tanasoglo // *Metallicheskie konstruksii [Metal Structures]*. — Vol. 16. — № 3. — 2010. — P. 189–198. [in Russian]
12. Krylov S.V. Ispitaniya podderzhivayushchikh zazhimov v dinamicheskom rezhime obriva provodov fazi VL [Testing of Supporting Clamps in the Dynamic Mode of VL Phase Wire Breakage] / S.V. Krylov // *Materiali 2-go nauchno-tehnicheskogo seminar «Problemi mekhaniki VL, klimaticheskie usloviya, nagruzki i vozdeystviya, kolebaniya provodov i metodi ikh ogranicheniya» [Materials of the 2nd scientific and technical seminar "Problems of overhead line mechanics, climatic conditions, loads and impacts, wire fluctuations and methods of their limitation"]*. — Moscow: VNIIE, 2004. — P. 1–20. [in Russian]
13. Timashova L.V. Povishenie nadezhnosti vozduzhnikh linii elektroperedachi i optimizatsiya ikh proektirovaniya pri primenenii provodov novogo pokoleniya [Improving the Reliability of Air Transmission Lines and Optimizing Their Design by Using New Generation Conductors] / L.V. Timashova, I.A. Nikiforov, S.V. Kolosov [et al.] // *CIGRE. Doklad B2-205 [CIGRE. Report B2-205]*. — 2014. — 12 p. [in Russian]
14. Kolosov S.V. Povishenie propusknoi sposobnosti VL: analiz tekhnicheskikh reshenii [Increasing the Capacity of Transmission Lines: Analysis of Technical Solutions] / S.V. Kolosov, S.V. Rizhov, V.E. Syuksin // *Opit, ustremlyeniye v budushchee [Experience for the Future]*. — Moscow: Elektrosetstroiproekt, 2013. — P. 26–36. [in Russian]
15. Galiaskarov I.M. Once again about the cyclicity of accidents in the main networks of power systems / I.M. Galiaskarov, M.Sh. Misrikhanov, V.N. Ryabchenko // *Electricity*. — 2019. — № 11. — P. 4–11. — DOI: 10/24150/0013-5380-2019-11-4-11.
16. Tanasoglo A.V. Teoreticheskie issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya promezhutochnikh vysokovoltных опор pri deistvii nagruzok ot obrivov provodov [Theoretical Research of the Stress-Strain State of Intermediate High-Voltage Supports under the Action of Loads from Broken Conductors] / A.V. Tanasoglo, I.M. Garanzha, S.N. Mishura // *Sovremennoye stroitelstvo i arkhitektura [Modern Construction and Architecture]*. — 2016. — № 2 (02). — P. 23–26. [in Russian]
17. Kachanovskaya L.I. Proektirovaniye bolshikh perekhodov cherez vodnie pregradi s primeneniem visokotemperaturnykh provodov [Design of Large Crossings over Water Bodies Using High-Temperature Wires] / L.I. Kachanovskaya, P.I. Romanov, Ye.D. Konstantinova [et al.] // *Elektroenergiya: peredacha i raspredeleniye [Electricity: Transmission and Distribution]*. — 2013. — № 1 (16). — P. 54–56. [in Russian]
18. Kogan F.L. Defektoskopiya provodov i grozozashchitnykh trosov vozduzhnikh linii elektroperedachi [Defectoscopy of wires and lightning protection cables of overhead power lines] / F.L. Kogan, R.S. Kaverina, S.V. Khomenko [et al.] // *Energetik [The power engineer]*. — 2002. — № 9. — P. 22–24. [in Russian]
19. Mishchenko V.V. Montazh provodov gibkikh svyazei i zakhodov vozduzhnikh linii elektroperedachi na GES: problemi proektirovaniya i sposobi ikh resheniya [Installation of flexible links and overhead power lines at hydroelectric power plants: design problems and solutions] / V.V. Mishchenko // *Izvestiya VNIIG im. B. Ye. Vedeneeva [Proceedings of VNIIG named after B. E. Vedeneev]*. — 2022. — Vol. 306. — P. 61–70. [in Russian]
20. Oshero B.L. Ispitaniya promezhutochnykh опор dinamicheskimi nagruzkami [Testing of Intermediate Supports with Dynamic Loads] / B.L. Oshero // *Elektricheskie stantsii [Electric Stations]*. — 1974. — № 11. — P. 15–19. [in Russian]
21. Travush V.I. Survivability of structural systems of buildings with special effects / V.I. Travush, N.V. Fedorova // *Engineering and Construction Journal*. — 2018. — № 5. — P. 73–80. — DOI: 10.18720/MCE.81.8.
22. Kolchunov V.I. Zhivuchest zdaniy i sooruzheniy pri zaproektnykh vozdeystviyakh [Survivability of Buildings and Structures under Unplanned Loads] / V.I. Kolchunov, N.V. Klyueva, N.B. Androsova [et al.]. — Moscow: ASV Publishing House, 2014. — 208 p. [in Russian]
23. Kolchunov V.I. Zhivuchest konstruktivnykh sistem zdaniy i sooruzheniy: analiticheskii obzor issledovaniy [The Survivability of Structural Systems of Buildings and Structures: An Analytical Review of Research] / V.I. Kolchunov, T.A. Ilyushchenko, N.V. Fedorova [et al.] // *Stroitelstvo i rekonstruktsiya [Construction and Reconstruction]*. — 2024. — № 3 (113). — P. 31–71. — DOI: 10.33979/2073-7416-2024-113-3-31-71. [in Russian]
24. Senkin N.A. Avarii i progressiruyushchee obrusheniye konstruksii vozduzhnikh linii elektroperedachi [Accident and Progressive Collapse of Overhead Transmission Lines] / N.A. Senkin // *Aktualnye problemi kompyuternogo modelirovaniya konstruksii i sooruzheniy: tezisi dokladov IX Mezhdunarodnogo simpoziuma [Current Problems of Computer Modeling of Structures and Constructions]: Abstracts of the IX International Symposium* / Penza State University of Architecture and Construction. — Penza: PSU Publishing House, 2025. — P. 106–107. [in Russian]
25. Senkin N.A. Progressiruyushchee obrusheniye i vosstanovleniye konstruksii vozduzhnikh linii elektroperedachi [Progressive Collapse and Restoration of Structures of Overhead Power Lines] / N.A. Senkin // *Izvestiya vuzov. Stroitelstvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]*. — 2023. — № 10. — P. 5–20. — DOI: 10.32683/0536-1052-2023-778-10-5-20. [in Russian]
26. Senkin N.A. Uchet progressiruyushchego obrusheniya pri proektirovaniy opor vozduzhnikh linii elektroperedachi [Taking into account progressive collapse in the design of overhead power line supports] / N.A. Senkin // *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov [Bulletin of Civil Engineers]*. — 2022. — № 4 (93). — P. 37–46. — DOI: 10.23968/1999-5571-2022-19-4-37-46. [in Russian]
27. Senkin N.A. Deistvitelnaya rabota stalnykh konstruksii vozduzhnikh linii elektroperedachi napryazheniem 35 kV i vishe [Actual operation of steel structures of overhead power lines with a voltage of 35 kV and higher] / N.A. Senkin, T.E. Belyakova, D.A. Malchikov [et al.] // *Metallicheskie konstruksii [Metal Structures]*. — DonNASA, 2022. — Vol. 28. — № 1. — P. 5–18. [in Russian]



28. Proektirovanie meropriyatii po zashchite zdanii i sooruzhenii ot progressiruyushchego obrusheniya: metodicheskoe posobie [Design of Measures to Protect Buildings and Structures from Progressive Collapse: A Methodological Guide]. — Moscow: Minstroy RF, 2018. — 158 p. [in Russian]
29. Zelichenko A.S. Vibor tipa podderzhivayushchikh zazhimov na liniyakh 330-750 kV [Selection of the Type of Supporting Clamps on 330-750 kV Lines] / A.S. Zelichenko, Ye.A. Khvoles, N.V. Chaplina // Elektricheskie stantsii [Electric Stations]. — 1970. — P. 55–59. [in Russian]
30. Krilov A.N. Vibratsiya sudov [Vibration of ships] / A.N. Krilov // Sobranie trudov akademika A.N. Krilova [Collection of works of Academician A.N. Krylov]. — Moscow; Leningrad: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1948. — Vol. 10. — 406 p. [in Russian]