



**СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ/CONSTRUCTION STRUCTURES,
BUILDINGS AND STRUCTURES**

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.70.9>

EDN: VJPZUA

**ДЕЙСТВИТЕЛЬНАЯ РАБОТА КОНСТРУКЦИЙ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ: АВАРИИ И
ЖИВУЧЕСТЬ**

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

Аварийные повреждения конструкций, включая падение опор воздушных линий электропередачи (ВЛ), отвечают действительной работе конструкций и могут привести к наступлению прогрессирующего обрушения (ПО): сначала наступает ПО первого рода (ПО-1) по причине внешнего воздействия, разрушающего опору, а затем ее падение может привести к ПО второго рода (ПО-2) с аварийными повреждениями и падениями соседних опор. Разработан новый аварийный режим, включающий пять расчетных подрежимов с расчетами опор на:

- 1 — обрыв проводов;
- 2 — обрыв грозозащитных тросов;
- 3 — падение промежуточной опоры;
- 4 — обрыв гирлянды изоляторов проводов;
- 5 — обрыв гирлянды изоляторов грозозащитных тросов.

Предложены варианты обеспечения живучести конструкций ВЛ, препятствующие разрушению опор на границе аварийного пролета и далее посредством снижения дополнительных усилий в грозотросе и проводах за счет разработки поддерживающих зажимов с возможностью продергивания в них проводов и тросов без разрушения токопроводящих алюминиевых повивов.

Ключевые слова: воздушная линия электропередачи, решетчатая стальная опора, аварии, прогрессирующее обрушение.

THE ACTUAL OPERATION OF OVERHEAD POWER LINE STRUCTURES: ACCIDENTS AND RESILIENCE

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

Structural damage caused by accidents, including the collapse of overhead power line (OPL) towers, reflects the actual performance of the structures and may lead to progressive collapse (PC): first, a Type 1 progressive collapse (PC-1) occurs due to an external impact that destroys the structure, and then its collapse may lead to a Type 2 progressive collapse (PC-2) involving emergency damage and the collapse of adjacent towers. A new accident mode has been developed, comprising five design sub-modes with calculations for towers under:

- 1 — wire breakage;
- 2 — lightning protection cable breakage;
- 3 — failure of an intermediate bearing;
- 4 — breakage of the string of conductor insulators;
- 5 — breakage of the string of lightning protection cable insulators.

Options have been suggested to ensure the survivability of overhead line structures, preventing the failure of supports at the boundary of the emergency span and beyond by reducing additional stresses in the lightning protection cable and conductors through the development of support clamps that allow conductors and cables to be pulled through them without damaging the conductive aluminium layers.

Keywords: overhead power line, lattice-type steel tower, accidents, progressive collapse.

Введение

На основании «Правил расследования причин аварий и инцидентов в электроэнергетике» (далее, Правила), утв. пост. Правительства РФ от 29.09.2025 г. № 1489, под технологическим нарушением в электроэнергетике понимается аварийное отключение и (или) повреждение линии электропередачи в целом, причем технологическое нарушение является аварией, если произошло прекращение электроснабжения потребителей электроэнергии суммарной мощностью 100 МВт и более. Следовательно, повреждение ВЛ в целом, как полное прекращение функционирования ВЛ, является результатом падения опоры (опор) как аварии ВЛ (рисунок 1) [1].



Рисунок 1 - Групповая авария на участке двухцепной ВЛ 220 кВ «Дорохово – Слобода 1,2» №№ 57-60 с падением промежуточной опоры № 60 и аварийным повреждением соседних трех промежуточных опор №№ 57-59 в Подмоскowie

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.70.9.1>

Примечание: 14.07.2016

Например, недавние повреждения на 4 ВЛ 154 кВ в Мурманской обл. с падением 5 промежуточных опор на оттяжках и аварийным повреждением еще одной промежуточной опоры и обрывом стального грозозащитного троса (ГЗТ) на участке двух временных деревянных опор в период (23.01–04.02.2026) привели к отключению электроснабжения (блэкаут) Мурманска и Североморска с введением режима чрезвычайной ситуации по причине значительного износа конструкций в связи с продолжительной эксплуатацией (рисунок 2).



Рисунок 2 - Авария с падением стальных опор на оттяжках на 4-х ВЛ 154 кВ в 7 км от Мурманска в сторону Североморска в период 23.01-04.02.2026:

а – разрушенная упавшая промежуточная опора на оттяжках; б – временная деревянная опора с ожиданием установки проектной стационарной стальной опоры на оттяжках

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.70.9.2>

Вышеприведенные примеры подтверждают высокую актуальность статьи в связи значительной протяженностью отечественных ВЛ, составляющей более 2,5 млн км в составе ПАО «Россети» для разных классов напряжений 0,4–750 кВ [2], а также по причине их неудовлетворительного технического состояния и высокой аварийностью [3]. Также задача анализа действительной работы конструкций имеет высокий уровень новизны и актуальности в связи с выявлением новых фактов аварийных повреждений и динамических воздействий на конструкции. На основании требований п. 5.6 СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» [4] 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 ГЗТ, 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.

Первой задачей данной публикации представляется анализ аварийных повреждений конструкций ВЛ 35-750 кВ, вторая задача определяет новую модель аварийного режима работы ВЛ, дополняющую представленную в ПУЭ-7 «Правила устройства электрических установок» [5], а третья — защиту конструкций от аварий или обеспечение так называемой живучести, определяя новизну публикации.

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 [6], среди которых «наиболее существенной является нагрузка аварийного тяжения, в ее изучении имеются две стороны: величина тяжения и эффект воздействия на опору. Величина тяжения зависит от многих факторов (ветер, гололед, изменение температуры, количество оборванных проводов, местные дефекты проводов и тросов, изоляции и цепной арматуры) и должна изучаться при совокупном учете их».

ВЛ является сооружением — линейной строительной системой, имеющей наземную, надземную и подземную части, состоящую из строительных конструкций и, добавим, электротехнических компонентов, предназначенную для передачи электрической энергии. Согласно п.2.5.2 ПУЭ-7 [5], ВЛ — линейная строительная система — устройство для передачи электроэнергии по проводам, расположенным на открытом воздухе и прикрепленным при помощи изоляторов и линейной арматуры к опорам или несущим конструкциям, представлена в виде модели вантово-стержневой системы (ВСС). На основе современного табличного процессора «MS Excel» разработана авторская «Программа расчета воздушной линии электропередачи при аварийных ситуациях как линейной вантово-стержневой системы» [7] (далее «Программа»), позволяющая последовательно выполнять следующие расчеты с определением усилий и перемещений элементов: обрыв фазы проводов или ГЗТ, обрыв гирлянды изоляторов или разрушение одной из промежуточных опор с ее падением. Выполненный расчёт позволил определить усилия тяжения в проводах и тросах, перемещения точек подвеса и длину возможного продёргивания проводов и тросов в поддерживающих зажимах или их обрыв.

Методы исследования: аварии и новый аварийный режим

Доклад по теме «Аварии и прогрессирующее обрушение конструкций воздушных линий электропередачи» был представлен автором на IX Международном симпозиуме «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений», проведенном в ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства» 21–24 мая 2025 г. [8].

Предложен новый аварийный режим, который наряду со старым в ПУЭ-7 [5], регламентирующим два подрежима с расчетами опор (1 — на обрыв проводов (рисунок 3), 2 — на обрыв грозозащитных тросов) дополнен тремя новыми подрежимами: 3 — падение промежуточной опоры, 4 — обрыв гирлянды изоляторов с проводом (проводами), 5 — обрыв гирлянды изоляторов с грозозащитным тросом. Таким образом, последовательно выполняются прочностные расчеты по 5 компонентам, составляющим ВСС, что несомненно повышает надежность и безопасность ВЛ в целом.

2.1. Расчет на обрыв проводов и грозозащитных тросов (подрежимы 1 и 2)

В соответствии с п. 2.5.142 ПУЭ-7 [5] расчётная условная горизонтальная нагрузка на свободностоящую металлическую опору, а также опоры на оттяжках из разных материалов, от проводов на ВЛ с нерасщепленными или однопроводными фазами (площадь сечения алюминиевой части до 185 мм²) с коэффициентом надежности 1,3 (коэффициент динамичности при обрыве):

$$T_{aB} = 0,5T_{max} = 0,5 \cdot 1,3T_{max}^n = 0,65T_{max}^n, \quad (1)$$

где T_{max} — наибольшая расчетная нагрузка от тяжения провода;

T_{max}^n — наибольшая нормативная нагрузка от тяжения провода.

То же при сечении алюминиевой части проводов 205 мм² и более:

$$T_{aB} = 0,4T_{max} = 0,4 \cdot 1,3T_{max}^n = 0,52T_{max}^n. \quad (2)$$

Аналогично согласно п. 2.5.143 ПУЭ-7 [5] нагрузка от тяжения при обрыве одиночного троса:

$$T_{aB} = 0,5T_{max} = 0,5 \cdot 1,3T_{max}^n = 0,65T_{max}^n. \quad (3)$$

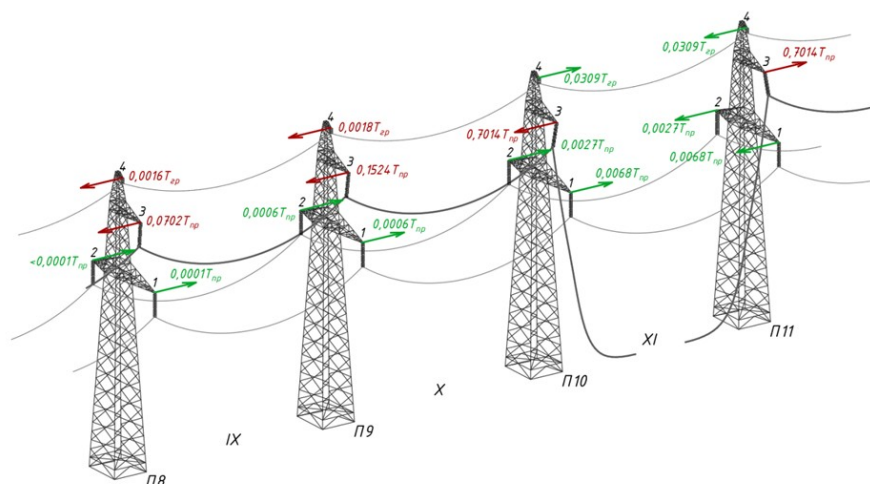


Рисунок 3 - Действующие расчетные усилия на опоры после обрыва провода №3 в пролете XI относительно усилия в проводе до разрыва $T_{пр}$, в ВСС с промежуточными опорами новой унификации типа ПЗ30н-1
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.70.9.3>

Полученные усилия от тяжения проводов и тросов на промежуточные опоры в результате выполненных расчётов по «Программе» могут быть использованы как дополнительные нагрузки для расчёта конструкции опор и определения несущей способности их элементов (рисунок 3). На основе авторских исследований динамических воздействий на конструкции ВЛ в аварийном режиме работы для одиночного троса либо провода коэффициент надежности (коэффициент динамичности при обрыве) с учетом результатов натурных испытаний опор ВЛ 500 кВ в 1970-х годах ОАО «Фирма ОРГРЭС» и ОАО «Энергосетьпроект» [9], [10], [11] получен равным 2,0, тогда формула (1) изменяется на (4)

$$T_{aB} = 0,5T_{max} = 0,5 \cdot 2,0T_{max}^n = 1,0T_{max}^n \quad (4)$$

2.2. Расчет ВСС на падение промежуточной опоры (подрезим 3)

Для иллюстрации действительной работы опор в составе линейной цепи ВЛ представлена реальная аварийная ситуация, произошедшая в Кемеровской обл., когда под действием ураганного ветра упали две соседние промежуточные стальные опоры с их разрушением и отключением ВЛ 110 кВ (рисунок 4) [12].



Рисунок 4 - Две схемы падения двухцепных промежуточных опор в групповой аварии на ВЛ 110 кВ в Кемеровской обл. от ветра:

a – потеря несущей способности фундаментов опоры; *б* – потеря устойчивости сжатых поясов под нижней траверсой

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.70.9.4>

Примечание: май 2015 г

Из анализа характерной групповой аварии, когда падают две соседние опоры, на рисунке 4 следует, что при действии сверхрасчетного ветра первая опора упала из-за потери несущей способности фундаментов — железобетонных свай, выдернутых из слабого грунта, вторая соседняя опора — по причине потери устойчивости сжатых поясов ствола опоры под нижней траверсой, а также под действием значительных тяжений проводов и троса, возникших от падения первой опоры. Например, из рисунка 4, б следует, что в стальном ГЗТ возникло сверхрасчетное усилие, из-за которого он продернулся в поддерживающем зажиме, о чем свидетельствует оборванный заземляющий соединитель, который до обрыва крепился к металлоконструкции тросостойки опоры. Из анализа результатов данной аварии назначены две основных расчетных схемы, моделирующие кинематическую изменяемость конструкции опоры, падающей с поворотом относительно условного шарнира (рисунок 5, а): в первом случае — разрушение фундаментов

или анкерных болтов с образованием нижнего шарнира (т. 7), а во втором случае — потеря устойчивости сжатых поясов ствола опоры с шарниром под нижней траверсой (т. 1) на рисунке 5, б. Падающая опора в аварийном пролете или её разрушенная часть превращается в кинематически изменяемую конструкцию, потерявшую несущую способность, но сохраняющую взаимодействие с другими элементами в линейной вантово-стержневой системе (проводами, тросом, изоляторами, соседними и другими опорами). При этом падение опоры с увеличением угла наклона α от вертикальной оси ограничивается с ростом распорной реакции от троса и проводов и восстановлением неизменяемости уцелевшей части ствола опоры. Поэтому при падении опоры в тросе и проводах возникают дополнительные усилия из-за перемещения ее траверс и ствола из створа ВЛ, а также точек крепления к траверсам и тросостойке троса, проводов и изоляторов.

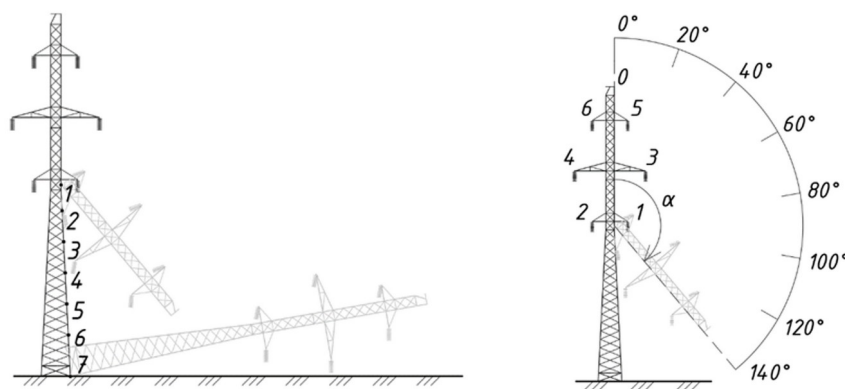


Рисунок 5 - Модели разрушения промежуточной опоры П1110-6:

а – назначены 7 условных точек поворота падающей части опоры; б – угол поворота α падающей части ствола в интервале (0...140°)

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.70.9.5>

Примечание: точки подвеса гирлянд изоляторов проводов (1..6), троса (0)

Математическая модель ВСС, представленная выше [7], позволяет решать задачу определения редуцированных тяжёлых проводов и тросов во всех пролетах анкерного участка ВЛ, а также нагрузок от них на опоры в аварийном пролете при обрыве провода или троса. Модель дополнена возможностью учета перемещений точек крепления троса и проводов фазы и отклонения гирлянд изоляторов по всем трём направлениям, прикрепленным к падающей промежуточной опоре. В связи с большей жесткостью анкерно-угловой опоры и применением натяжных гирлянд изоляторов, точки крепления тросов, проводов и изоляторов к такой опоре приняты неподвижными. Таким образом, расчётная схема локализованной ВСС при использовании принципа симметрии включает одну абсолютно жёсткую анкерно-угловую опору и несколько промежуточных деформирующихся опор, связанных между собой проводами и тросами [7] (рисунок 6). Здесь вариант с оборванным ГЗТ отличается резко пониженным воздействием на промежуточную опору при падении соседней опоры в аварийном пролете: горизонтальная нагрузка на опору сокращается в 1,7 раза по сравнению с необорванным ГЗТ. На рисунке 6 приведены численные значения усилий в грозотросе и проводах относительно усилий в ГЗТ ($T_{гзт}$) и проводе ($T_{пр}$), вычисленных для них в нормальном режиме до обрыва. Кроме того, получены результаты расчёта ВСС при конечном положении разрушаемой части опоры с углом $\alpha=140^\circ$ (рисунок 5, б) для рассматриваемого участка линии, где параметрами назначены длина пролёта и марка подвешиваемого провода при неизменной марке ГЗТ 11.0-МЗ-В-ОЖ-Н-Р.

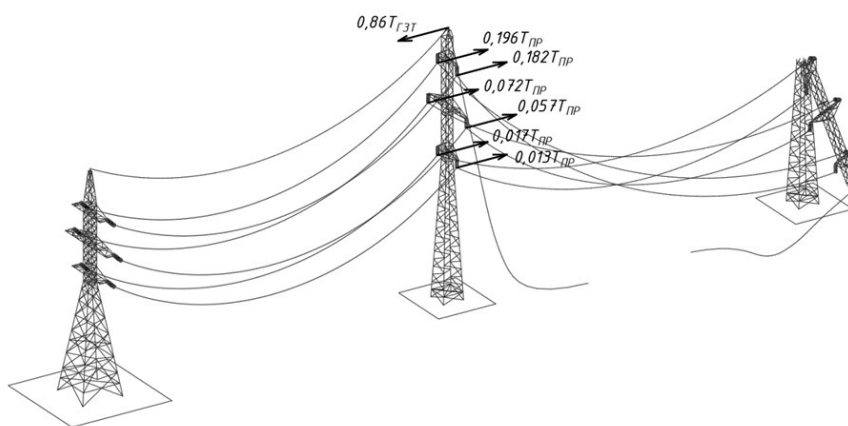


Рисунок 6 - Усилия тяжения в проводах и ГЗТ, воздействующие на соседнюю промежуточную опору при падении опоры в аварийном пролете с обрывом ГЗТ
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.70.9.6>

Примечание: усилия и воздействия на соседнюю опору представлены для глухих зажимов, не допускающих продергивания

Так, при повышении площади поперечного сечения провода, например, от марки АС240/32 до АС500/64, конечное усилие при $\alpha=140^\circ$ возрастает в 3,0 раза при пролете 250,0 м и в 2,16 раза — при пролете 350 м. При этом конечное усилие соответственно возрастает от 0,554 до 0,842 разрывного усилия в проводах, что определяет высокий риск разрушения провода АС500/64 при небольшом пролете 250,0 м. Вариант падения опоры с поворотом относительно точки 7 (рисунок 5, а), как правило, реализуется при исчерпании несущей способности фундаментов либо фундаментных болтов и является основным для расчета.

2.3. Расчет на обрыв и падение гирлянды изоляторов (подрезимы 4 и 5)

Обрыв гирлянды изоляторов с падением на провода фазы представляет собой существенную ударную нагрузку, на воздействие которой целесообразно выполнить проверочный расчет проводов и грозотросов с использованием «Программы» [7]. В расчете рассмотрен участок линии ВЛ 330 кВ, состоящей из одноцепных анкерно-угловых опор УЗ30н-1+14 и промежуточных ПЗ30н-1 с проводами марки АС 300/66 и грозотросами марки 11.0-МЗ-В-ОЖ-Н-Р (таблица 1). В качестве поддерживающих изолирующих подвесок для проводов использованы гирлянды изоляторов из стекла длиной 3,1 м и массой 140 кг, а для ГЗТ — длиной 0,7 м и массой 30 кг (рисунок 7).



Рисунок 7 - Обрыв и падение гирлянды изоляторов на два провода фазы двухцепной ВЛ 330 кВ «Гатчинская – Лужская»

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.70.9.7>

Примечание: 2014

Таблица 1 - Усилия в проводах и тросах при обрыве гирлянды изоляторов

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.70.9.8>

Элементы системы	Усилия тяжения в проводах или ГЗТ, кН				$T_{пр} / T_{нач}$
	до обрыва $T_{нач}$	после обрыва гирлянды $T_{обр}$	Разница ($T_{обр} - T_{нач}$)/ $T_{обр}$	на промежуточную опору $T_{пр}$	
Провод 1	98,8	98,7	-0,001	-0,1	-0,002
Провод 2	98,8	98,7	0,001	-0,1	-0,001
Провод 3	98,8	134,2	0,358	8,0	0,081
Грозотрос	32,9	32,8	-0,003	-0,2	-0,006

Примечание: нумерация провода для одноцепной опоры - см. рисунок 3

Для анализа такой аварийной ситуации математическая модель скорректирована так, что положение координат задаётся только для одной из 4-х точек, где произошел обрыв (нижняя траверса), а остальные становятся включенными в совместную работу всей линейной системы ВЛ. Полученные статическим расчётом результаты (Таблица 1) показывают разницу усилий тяжения в $0,081T_{max}$, что в несколько раз меньше усилия $0,4T_{max}$, принимаемой по 2.5.142 ПУЭ-7 «Правила устройства электроустановок» [5] для ВЛ 330 кВ, где T_{max} — наибольшая расчетная нагрузка от тяжения проводов в аварийном режиме. Следовательно, таким воздействием на провода (подрезим 4), аналогично и на грозотросы (подрезим 5), можно пренебречь.

Основные результаты: живучесть конструкций ВЛ

Профессор В.И. Колчунов пишет, что «выполнен ряд исследований, связанных не только с проблемой конструктивной безопасности как характеристики неразрушимости несущей системы при эксплуатации объекта недвижимости, но и с решением проблемы живучести как характеристики сопротивляемости конструктивной системы

прогрессирующему разрушению при внезапных запроектных воздействиях» [13]. В последующей статье он добавил: «существует два подхода к проверке сопротивления конструктивных систем зданий и сооружений особым или аварийным воздействиям [14]. Первый подход — традиционный, применяется, когда известна или установлена величина и место приложения особого воздействия (проектный сценарий, основанный на идентифицированных воздействиях) в соответствии с СП 296.1325800. 2017 «Здания и сооружения. Особые воздействия» [15]. Второй и наиболее часто встречающийся подход — проектирование защиты от прогрессирующего обрушения, когда величина, направление, время приложения и продолжительность действия особого или аварийного воздействия неизвестны. Применительно к этому случаю принят ситуационный подход, предполагающий рассмотрение вторичной расчетной схемы сооружения, в которой рассматривается по отдельности последовательное удаление одного из несущих элементов. При этом проверка живучести поврежденной конструктивной системы должна показать, что не произойдет разрушения в «зоне возможного локального разрушения» и тем более прогрессирующего (непропорционального) обрушения всего здания или большей его части. При таком расчете проверяется соответствие конструкций требованиям и критериям особого предельного состояния. По действующим нормам (СП 385.1325800.2018 «Защита зданий и сооружений от прогрессирующего разрушения. Правила проектирования. Основные положения» [16]) расчетный анализ защиты от прогрессирующего обрушения может быть произведен в статической постановке, либо кинематическим методом теории предельного равновесия, а также в динамической постановке» [14].

Здесь исследуются два рода последовательно возникающих аварийных ситуаций, приводящих к прогрессирующему обрушению конструкций: первый, относящийся к локальному повреждению элементов несущей конструкции опоры ВЛ, который может привести к прогрессирующему обрушению первого рода ПО-1 с падением опоры (рисунок 8). Здесь следует применить ситуационный подход для модели прогрессирующего обрушения ПО-1 с неопределенным сценарием [14], поэтому создание живучести (работоспособности) ВЛ следует выполнить посредством обеспечения неразрушения вторичной схемы за счет устройства дополнительных раскрепляющих элементов, например горизонтальных диафрагм, ограничивающих расчетные длины раскосов и поясов в нижней части конструкции опоры, либо за счет увеличения сечений рабочих элементов [17].



Рисунок 8 - Падение промежуточной стальной опоры на ВЛ 220 кВ (1987) в Забайкалье от небольших ветровых нагрузок, ослабленной вандальным снятием нижних раскосов

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.70.9.9>

Примечание: 2022.09.06

Значительно сложнее решается задача обеспечения живучести при прогрессирующем обрушении второго рода ПО-2, когда разрыв «слабого звена» — падение даже одной опоры, например по причине ПО-1, может привести к коллапсу всей цепи посредством значительных усилий в проводах, особенно в грозозащитных тросах. Тема

взаимодействия опор, проводов, ГЗТ и гирлянд изоляторов приводит к образованию единой ВСС, в связи с чем деформации ствола и траверс приводят к изменению усилий в проводах и ГЗТ, а особенно падение промежуточной опоры вызывает аварийные повреждения соседних промежуточных опор. По п. 4.4.5 ГОСТ Р 51177-2017 «Арматура линейная. Общие технические требования» [19] прочность заделки стальных тросов 11.0-МЗ-В-ОЖ-Н-Р в поддерживающих зажимах должна составлять не менее 5% от разрывного усилия 154,8 кН (СТО 71915393-ТУ 062–2008 «Канаты стальные для защиты воздушных линий электропередачи от прямых ударов молнии. Технические условия» [20] при маркировочной группе 1860 Н/мм²), что составляет не менее 7,74 кН, а при превышении наступает продергивание троса (пунктир) со снижением воздействия на соседние опоры (рисунок 9). Из рисунка 9 следует, что с приближением падающей опоры к земле усилия тяжения в проводах и ГЗТ приобретают экстремальные значения, особенно при отсутствии продергивания (сплошная линия).

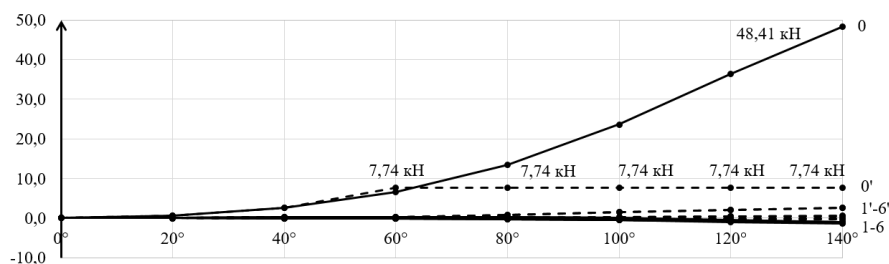


Рисунок 9 - Усилия тяжения одного провода (1÷6) и троса (0) с поддерживающими глухими зажимами без продергивания (сплошная линия) и с продергиванием (пунктир), воздействующие на промежуточную опору при разрушении соседней в аварийном пролете, в зависимости от угла поворота α с вращением относительно точки 1
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.70.9.10>

Более напряженная картина проявляется в пролете, следующем за аварийным (рисунок 10): здесь при отсутствии продергивания усилия в ГЗТ вырастают до предельного значения 140,46 кН, что может привести к разрыву ГЗТ, например, в пролете, где установлен линейный прессуемый соединитель, понижающий несущую способность ГЗТ на 10% ($154,8 \times 0,9 = 139,32$ кН). А это может привести к обрыву ГЗТ с аварийным падением соседних промежуточных опор и наступлением прогрессирующего обрушения второго рода (ПО-2) [12], [17], [18] с лавинообразным разрушением большинства промежуточных опор на анкерном участке ВЛ. Такое разрушение представляется новым и свойственным только линейным сооружениям типа ВЛ. Поэтому в целях обеспечения живучести ВСС предлагается обеспечить подвеску проводов к изоляторам на поддерживающих зажимах, обеспечивающих возможность продергивания троса и проводов без их повреждения (ПЗП). Это позволит эффективно понизить усилия в проводах и тросах, например, в ГЗТ до 111,82 кН или на 25,6% (рисунок 10), что станет основным вариантом, защищающим работоспособность ВЛ при падении одной опоры от падения соседних опор и наступления ПО-2. Однако это потребует существенного преобразования линейной арматуры, а именно поддерживающих зажимов, для обеспечения возможности продергивания проводов и тросов без повреждения алюминиевых повивов. Вторым вариантом обеспечения живучести является решение по ослаблению подвески крепления ГЗТ к тросостойке промежуточных опор, что благодаря их разрушению подвески приводит к значительному снижению усилий в проводах и ГЗТ, препятствуя дальнейшему разрушению ВСС.

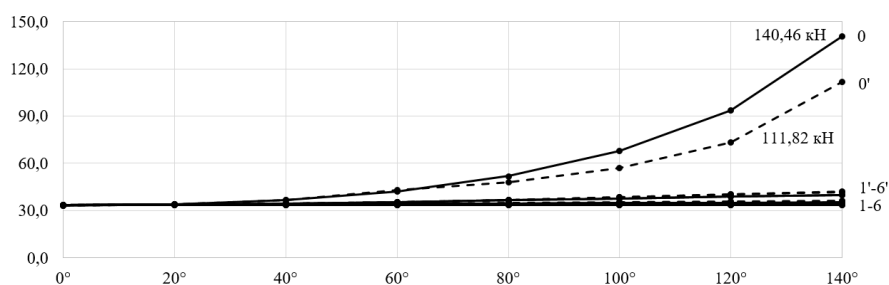


Рисунок 10 - Усилия тяжения одного провода (1÷6) и троса (0) в соседнем пролете от аварийного с поддерживающими глухими зажимами без продергивания (сплошная линия) и с продергиванием (пунктир), воздействующие на промежуточную опору при разрушении соседней в аварийном пролете, в зависимости от угла поворота α
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.70.9.11>

Таблица 2 - Результаты расчета несущей способности конструкции соседней опоры

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.70.9.12>

Элемент конструкции и соседней опоры типа П 110-6 с проводами марки АС240/32	Сечение	Коэффициенты использования несущей способности					
		основная расчётная схема	вид зажима и положение падающей опоры (угол α)				
			с возможностью продергивания, ПЗП				без ПЗП
			20°	40°	60°	80°	
нижняя первая панель пояса U1	└ 110×8	0,783	0,329	0,595	0,886	1,223	1,891
вторая снизу панель пояса U2	└ 110×8	0,717	0,325	0,613	0,909	1,242	2,135
третья снизу панель пояса U3	└ 90×7	0,809	0,429	0,817	1,213	1,654	2,931
пояс нижней траверсы U4	└ 63×5	0,392	0,361	0,374	0,396	0,427	0,394
пояс средней траверсы U5	└ 63×5	0,710	0,628	0,660	0,720	0,814	0,731
пояс верхней траверсы U4	└ 63×5	0,392	0,368	0,404	0,473	0,579	0,486
пояс тросостойки U6	└ 63×5	0,145	0,148	0,145	0,154	0,171	0,513

Несомненно, приемлемым решением обеспечения живучести представляется применение защитных стальных спиральных зажимов для защиты алюминиевых повивов от повреждения с укладкой в поддерживающий зажим большего типоразмера, что обеспечит возможность безаварийного продергивания провода.

Из анализа результатов расчета конструкции опоры следует, что перенапряжения элементов соседней опоры П110-6 (выделенные значения в таблице 2) возникают только при значительных углах отклонения α ствола падающей опоры от вертикали по причине разрушения фундаментов для критических элементов соседней опоры. Поэтому при проектировании опор ВЛ в качестве варианта № 4 обеспечения живучести конструкций соседних опор предлагается повышение несущей способности критических элементов, например, посредством увеличения их поперечных сечений.

Таким образом, реализация указанных вариантов обеспечит живучесть конструкций соседних промежуточных опор, расположенных на границе и за пределами аварийного пролета с упавшей опорой, что локализует аварию от ПО-2 в пределах аварийного пролета, как правило, с падением только одной промежуточной опоры. Очевидно, что защита конструкций опор от ПО-1 является основной, обеспечивающей устойчивость вантово-стержневой системы от падения опор, а защита от ПО-2 — вторичной, защищающей опоры от лавинообразного разрушения с групповым падением промежуточных опор.

Заключение

1. Реальные примеры аварий показывают, что аварийные повреждения конструкций, включая падение опор воздушных линий электропередачи, отвечают действительной работе конструкций и могут привести к наступлению прогрессирующего обрушения.

2. Подтверждено, что два рода прогрессирующего обрушения имеют последовательный характер: сначала наступает прогрессирующее обрушение первого рода ПО-1 по причине внешнего воздействия, разрушающего опору, а затем ее падение может привести к прогрессирующему обрушению второго рода ПО-2 с аварийными повреждениями и падениями соседних опор.



3. Для обеспечения живучести конструкций ВЛ необходимо обеспечить устойчивость от разрушения конструкций опор, прежде конструкции вторичной схемы от воздействий ПО-1.

4. Для проектирования ВЛ на воздействия ПО-2 разработан новый аварийный режим, включающий пять расчетных подрежимов с расчетами опор на:

- 1 — обрыв проводов;
- 2 — обрыв грозозащитных тросов;
- 3 — падение промежуточной опоры;
- 4 — обрыв гирлянды изоляторов проводов;
- 5 — обрыв гирлянды изоляторов грозозащитных тросов.

5. Предложены варианты обеспечения живучести конструкций ВЛ, препятствующие разрушению опор на границе аварийного пролета и далее посредством снижения дополнительных усилий в грозотросе и проводах за счет разработки:

1 — специальных поддерживающих зажимов с возможностью продергивания в них проводов и тросов без разрушения токопроводящих алюминиевых повивов;

2 — применение защитных стальных спиральных зажимов для защиты алюминиевых повивов от повреждения с укладкой в поддерживающий зажим большего типоразмера;

3 — конструкции подвески проводов и тросов с возможностью ее разрушения;

4 — усиления критических элементов конструкций опор на стадии проектирования.

6. При продолжении работы предполагается усложнение расчетной модели вантово-стержневой системы с приближением к действительной работе конструкций ВЛ с учетом нелинейного характера деформирования железобетона фундаментов и грунтового основания, включая нелинейную ползучесть материалов.

Благодарности

Автор выражает благодарность профессору, д.т.н. Владимиру Антоновичу Труллю, своему учителю.

Acknowledgement

The author expresses their gratitude to Professor Vladimir Antonovich Trull, Doctor of Technical Sciences, their teacher.

Конфликт интересов

конфликта интересов нет

Conflict of Interest

no conflict of interest

Рецензия

Кузнецов П.С., Государственный научно-исследовательский институт приборостроения, Москва
Российская Федерация
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.70.9.13>

Review

Kuznetsov P.S., State Scientific Research Institute of Instrument Engineering, Moscow Russian Federation
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.70.9.13>

Список литературы / References

1. Правила расследования причин аварий в электроэнергетике и инцидентов в электроэнергетике: Утв. Пост. Правительства РФ от 29.09.2025 г. № 1489. — Москва: СО ЕЭС, 2025. — 33 с.

2. Архипов М. «Достичь максимальной независимости» Глава ПАО «Россети» Андрей Рюмин — о том, как в стране удалось заместить импорт / М. Архипов. — 2022. — URL: <https://lenta.ru/articles/2022/04/14/zameshchenie/> (дата обращения: 19.02.2026).

3. Положение ПАО «Россети» «О Единой технической политике в электросетевом комплексе»: Утв. Сов. Директоров ПАО «Россети» (протокол от 22.02.2017 № 252). — Москва: ПАО Россети, 2017. — 196 с. — URL: https://www.ruscable.ru/other/tehpolitika_10_8_17.pdf (дата обращения: 19.02.2026).

4. СП 20.133330.2016. Свод правил. Нагрузки и воздействия (с Изм. 1-6) / НИЦ Строительство. — ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 2025. — 146 с.

5. ПУЭ-7. Правила устройства электроустановок. Издание 7. — 2003. — 330 с. — URL: <https://www.elec.ru/library/direction/pue.html> (дата обращения: 19.02.2026).

6. 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.

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024666218 Российская Федерация. Расчет воздушной линии электропередачи при аварийных ситуациях как линейной вантово-стержневой системы : № 2024666218 : опубликовано 17.07.2024 / Сенькин Н.А. — Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ. — URL: <https://fips.ru/EGD/e6d8eb75-97a1-423e-9845-7ba966598f2d> (дата обращения: 01.08.2024).

8. 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.

9. Хохарин А.Х. Экспериментальное исследование работы предварительно напряженной стальной конструкции опоры ЛЭП 400 кВ / А.Х. Хохарин // Промышленное строительство. — 1959. — № 5. — С. 40–44.

10. 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.



11. 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.
12. Сенькин Н.А. Взаимодействие конструктивных элементов в линейной цепи воздушной линии электропередачи при падении опоры / Н.А. Сенькин, А.С. Филимонов // Строительная механика и расчет сооружений. — 2024. — № 6 (317). — С. 27–34. — DOI: 10.37538/0039-2383.2024.6.27.34.
13. Колчунов В.И. Живучесть зданий и сооружений при запроектных воздействиях / В.И. Колчунов, Н.В. Клюева, Н.Б. Андросова [и др.]. — Москва: АСВ, 2014. — 208 с.
14. 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.
15. СП 296.1325800.2017. Свод правил. Здания и сооружения. Особые воздействия (с Изм. № 1,2) / НИЦ Строительство. — ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 2025. — 31 с.
16. СП 385.1325800.2018. Свод правил. Защита зданий и сооружений от прогрессирующего разрушения. Правила проектирования. Основные положения» (с Изм. № 1-3): Утв. Приказом Минстроя и ЖКХ РФ от 5 июля 2018 г. № 393/пр. — 2022. — 33 с.
17. 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.
18. 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.
19. ГОСТ Р 51177-2017. Арматура линейная. Общие технические требования. — Москва: Стандартинформ, 2017. — 27 с.
20. СТО 71915393-ТУ 062-2008. Канаты стальные (грозотрос) для защиты воздушных линий электропередачи от прямых ударов молнии. Технические условия / Северсталь-метиз. — Волгоград, 2008. — 9 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Pravila rassledovaniya prichin avarii v elektroenergetike i intsidentov v elektroenergetike [Rules for investigating the causes of accidents in the electric power industry and incidents in the electric power industry]: Ed. Post. Government of the Russian Federation No. 1489 dated 09/29/2025. — Moscow: JSC SO UES, 2025. — 33 p. [in Russian]
2. Arkhipov M. «Dostich maksimalnoi nezavisimosti» Glava PAO «Rosseti» Andrei Ryumin — o tom, kak v strane udalos zamestit import [Achieving maximum independence: Andrey Ryumin, Head of Rosseti PJSC] / M. Arkhipov. — 2022. — URL: <https://lenta.ru/articles/2022/04/14/zameshchenie/> (accessed: 19.02.2026). [in Russian]
3. Polozhenie PAO «Rosseti» «O Yedinoi tekhnicheskoi politike v elektrosетevom komplekse» [On the Unified Technical Policy in the Electric Grid Complex]: Approved by Council of Directors of PJSC "Rosseti" (Minutes dated 22.02.2017 No. 252). — Moscow: PJSC Rosseti, 2017. — 196 p. — URL: https://www.ruscable.ru/other/tehpolitika_10_8_17.pdf (accessed: 19.02.2026). [in Russian]
4. SP 20.133330.2016. Svod pravil. Nagruzki i vozdeistviya (s Izm. 1-6) [SP 20.133330.2016. Code of Rules. Loads and Effects (with Amendments 1-6)] / JSC Research Center Construction. — Central Research Institute of Construction named after V.A. Kucherenko, 2025. — 146 p. [in Russian]
5. PUE-7. Pravila ustroystva elektroustanovok. Izdanie 7 [PUE-7. Rules for the Design of Electrical Installations. Edition 7]. — 2003. — 330 p. — URL: <https://www.elec.ru/library/direction/pue.html> (accessed: 19.02.2026). [in Russian]
6. Trull V.A. Issledovanie deistvitelnoi 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]
7. Certificate of State registration of the computer program № 2024666218 Russian Federation. Raschet vozdushnoi linii elektropredachi pri avariinikh situatsiyakh kak lineinoi vantovo-sterzhnevoi sistemi [Calculation of an overhead power line in emergency situations as a linear cable-rod system] : № 2024666218 : publ. 17.07.2024 / Senkin N.A. — Registered in the Register of Computer Programs. — URL. <https://fips.ru/EGD/e6d8eb75-97a1-423e-9845-7ba966598f2d> (accessed: 01.08.2024). [in Russian]
8. Senkin N.A. Avarii i progressiruyushchee obrushenie konstruksii vozdushnikh linii elektropredachi [Accident and Progressive Collapse of Overhead Transmission Lines] / N.A. Senkin / Aktualnie problemi kompyuternogo modelirovaniya konstruksii i sooruzhenii [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]
9. Khokharin A.Kh. Eksperimentalnoe issledovanie raboti predvaritelno 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 stroitelstvo [Industrial Construction]. — 1959. — № 5. — P. 40–44. [in Russian]
10. 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]
11. 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 // *Sovremennoe stroitelstvo i arkhitektura* [Modern Construction and Architecture]. — 2016. — № 2 (02). — P. 23–26. [in Russian]

12. Senkin N.A. Vzaimodeistvie konstruktivnykh elementov v lineinoi tsepi vozduzhnoi linii elektroperedachi pri padenii opori [Interaction of structural elements in the overhead transmission power line during a pole fall] / N.A. Senkin, A.S. Filimonov // *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii* [Structural Mechanics and Design of Structures]. — 2024. — № 6 (317). — P. 27–34. — DOI: 10.37538/0039-2383.2024.6.27.34. [in Russian]

13. Kolchunov V.I. Zhivuchest zdanii i sooruzhenii pri zaproektnykh vozdeistviyakh [Survivability of buildings and structures under out-of-design impacts] / V.I. Kolchunov, N.V. Klyueva, N.B. Androsova [et al.]. — Moscow: ASV, 2014. — 208 p. [in Russian]

14. Kolchunov V.I. Zhivuchest konstruktivnykh sistem zdanii i sooruzhenii: analiticheskii obzor issledovaniya [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]

15. SP 296.1325800.2017. Svod pravil. Zdaniya i sooruzheniya. Osobie vozdeistviya (s Izm. № 1,2) [SP 296.1325800.2017. Code of Rules. Buildings and Structures. Special Effects (with Amendments No. 1,2)] / JSC Research Center Construction. — Central Research Institute of Construction named after V.A. Kucherenko, 2025. — 31 p. [in Russian]

16. SP 385.1325800.2018. Svod pravil. Zashchita zdanii i sooruzhenii ot progressiruyushchego razrusheniya. Pravila proektirovaniya. Osnovnie polozheniya» (s Izm. № 1-3) [SP 385.1325800.2018. Code of Rules. Protection of Buildings and Structures from Progressive Destruction. Design Rules. Basic Provisions" (with Amendments No. 1-3)]: Approved by Order No. 393/pr of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation dated July 5, 2018. — 2022. — 33 p. [in Russian]

17. Senkin N.A. Uchet progressiruyushchego obrusheniya pri proektirovanii opor vozduzhnykh 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]

18. Senkin N.A. Progressiruyushchee obrushenie i vosstanovlenie konstruksii vozduzhnykh 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]

19. GOST R 51177-2017. Armatura lineinaya. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya [GOST R 51177-2017. Linear fittings. General technical requirements]. — Moscow: Standartinform, 2017. — 27 p. [in Russian]

20. STO 71915393-TU 062-2008. Kanati stalnie (grozotros) dlya zashchiti vozduzhnykh linii elektroperedachi ot pryamikh udarov molnii. Tekhnicheskie usloviya [STO 71915393-TU 062-2008. Steel ropes (lightning rods) for protecting overhead power lines from direct lightning strikes. Technical specifications] / Severstal-metiz. — Volgograd, 2008. — 9 p. [in Russian]