

ЗАЩИТА КОНСТРУКЦИЙ ОПОР ВЛ 330-750 КВ ОТ ПРОГРЕССИРУЮЩЕГО ОБРУШЕНИЯ

ФГБОУ ВО «СПбГАСУ»
Филимонов А.С., магистрант

Аннотация: В работе рассмотрены вопросы прогрессирующего обрушения (ПО) непосредственно для конструкций опор воздушных линий электропередачи (ВЛ) напряжением 330-750 кВ как для отдельных башенных или порталных сооружений. Выполнен анализ распределения усилий в элементах опор и перемещений узлов при их расчёте на ПО в условиях среднеэксплуатационного, аварийного и монтажного режимов работы при помощи программного комплекса SCAD 21.1. Начальное локальное разрушение конструкции учтено рассмотрением различных сценариев отказа несущих элементов вследствие их вандального снятия на высоте до 5 м. Каждый сценарий соответствует различной последовательности удаления прифундаментных элементов: поясов, раскосов, распорок и оттяжек, с учётом ударного воздействия, возникающего вследствие мгновенного исключения каждого элемента из системы. Предложены варианты защиты конструкций опор от ПО: усиление элементов, установка диафрагмы или изменение расчётной схемы, с соответствующими рекомендациями по их применению.

Ключевые слова: воздушные линии электропередачи, свободностоящие опоры, порталные опоры на оттяжках, прогрессирующее обрушение, предварительное напряжение.

В соответствии с нормативной документацией гл. 2.5 [1] и требованиями Главгосэкспертизы расчёт на ПО производится на комбинацию нагрузок в среднеэксплуатационном режиме. В соответствии с п. 5.2 [2] при проектировании зданий и сооружений должны быть разработаны сценарии реализации наиболее опасных аварийных расчетных ситуаций и разработаны стратегии для предотвращения ПО сооружения при локальном разрушении конструкций.

Каждый сценарий соответствует отдельному особому сочетанию нагрузок и должен включать в себя одно из нормируемых (проектных) особых воздействий или один вариант локальных разрушений несущих конструкций для аварийных особых воздействий. В качестве начального локального разрушения конструкции рассматривается отказ несущих элементов вследствие их вандального снятия на высоте до 5 м.

Двухцепная анкерно-угловая опора для линии электропередачи напряжением 330 кВ представ-

ляет собой жесткую конструкцию башенного типа со смешанной схемой расположения проводов типа «бочка» (см. Рисунок 1а). При разрушении нижней панели пояса наибольшее внутреннее усилие в других поясах не превышает предельного значения, что не выполняется для опорных раскосов. При разрушении одного из них перекрестная решетка превращается в одиночную треугольную, что увеличивает расчётную длину другого раскоса и вызывает потерю его устойчивости при центральном сжатии. Отказ элементов приводит к цепному разрушению следующих, что в конечном итоге приводит к полному обрушению опоры. Для защиты от ПО требуется обеспечить несущую способность опорного раскоса, что может быть выполнено в двух вариантах: установкой диафрагмы, регулирующей расчётную длину раскоса, или увеличением сечения уголка.

В соответствии с гл. 2.5 [1] среднеэксплуатационный режим является не единственным аварийным режимом, что даёт основание рассмотреть

остальные два режима: низшей температуры (с отсутствием ветра и гололёда) и гололёдный (с температурой при гололёде и отсутствием ветра), а также необходимо учесть монтажный режим (температура -15°C , ветровое давление на высоте 15 м над поверхностью земли 50 Па, гололёд отсутствует).

При мгновенном удалении любого из рассматриваемых элементов в соответствии с п 7.12 [3] вдоль оси стержня в расчетной схеме прикладывается нагрузка равная величине усилия в этом элементе с учётом ударного эффекта коэффициентом динамичности 1,3. В таком случае следует проанализировать множество сценариев, в ко-

тором каждый из них предполагает различную последовательность удаления прифундаментных элементов из системы: поясов и раскосов, что будет также эквивалентно рассмотренной выше конструкции опоры без одного опорного узла (см. Рисунок 1б). Перебор разных последовательностей позволяет учесть все возможные варианты развития событий и выявить расчётную комбинацию усилий для каждого элемента. Статический расчёт конструкции производится с использованием программного комплекса SCAD Office 21.1, предназначенного для численного исследования на ЭВМ напряженно-деформированного состояния и устойчивости конструкции.

Рисунок 1 – Конструкция опоры ВЛ 330кВ: а – визуализированная схема; б – удаляемые опорные элементы; в – прикладываемое динамическое усилие и установленная диафрагма

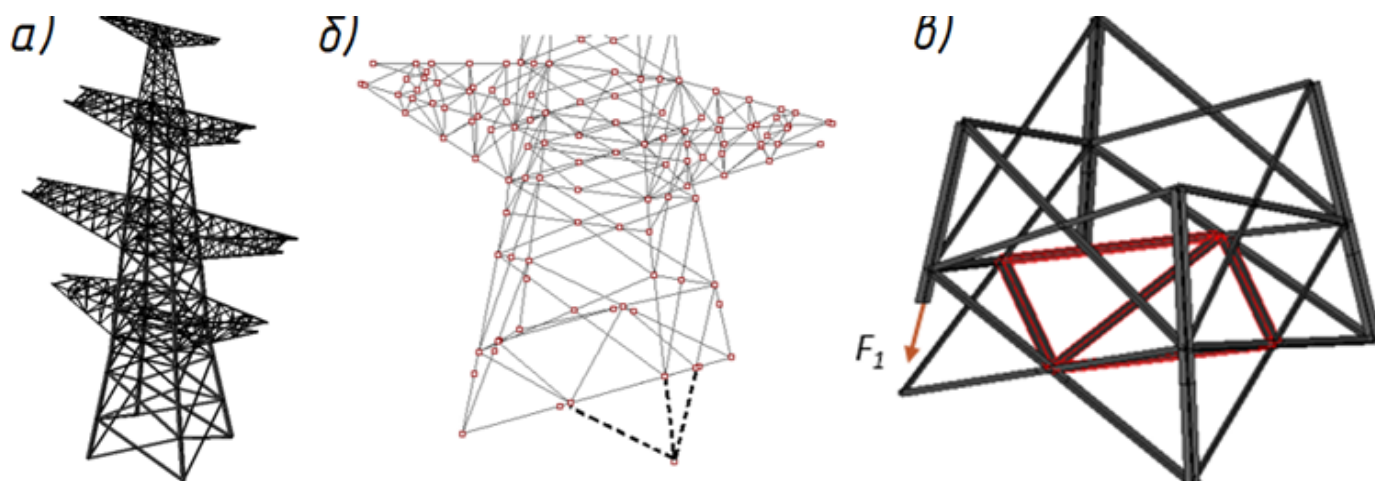


Таблица 1 – Усилия в элементах вторичной схемы с динамическим ударом

Вид опоры	Порядок удаления элементов						Наибольшее динамическое усилие от удаления пояса, кН	
	Пояс-Раскос-Раскос		Раскос-Пояс-Раскос		Раскос-Раскос-Пояс		Сжат. 1,3F	Раст. 1,3F
	Максимальное усилие в элементах, кН							
	Пояс	Раскос	Пояс	Раскос	Пояс	Раскос		
1АР. Среднеэксплуатационные условия ($T=+5^{\circ}\text{C}$, Ветер и гололед отсутствуют)								
Конц. 0°	-3014,4	-441,6	-2225,3	-290,4	-2226,9	-270,5	-932,8	508,8
Конц. 30°	-2275,5	-317,8	-2305,1	-325,5	-2329,7	-289,3	-1091,5	665,5
Анк.-угл. 70°	-2498,4	-320,3	-2540,1	-326,2	-2543,5	-309,3	-1069,1	551,1

2АР. Минимальная температура (Т=-45°С, Ветер и гололед отсутствуют)								
Конц. 0°	-2355,9	-308,8	-2401,2	-313,4	-2403,1	-291,0	-1006,7	582,8
Конц. 30°	-2458,5	-343,9	-2490,5	-352,2	-2516,6	-313,0	-1182,0	755,9
Анк.-угл. 70°	-2697,4	-346,1	-2742,1	-352,5	-2745,8	-334,4	-1154,1	636,1
3АР. Гололед (Т=-5°С, Провода и тросы покрыты гололедом бэ=15 мм)								
Конц. 0°	-3486,3	-458,0	-3549,8	-464,6	-3552,7	-430,4	-1488,3	1025,5
Конц. 30°	-3649,2	-514,9	-3695,8	-527,0	-3732,8	-471,1	-1766,4	1300,4
Анк.-угл. 70°	-4017,4	-517,1	-4082,0	-526,0	-4087,3	-499,6	-1717,2	1120,1
4АР. Возведение линии (Т=-15°С, Ветровое давление 50 Па, Гололед отсутствует, Тяжение 0,6Тmax с одной стороны)								
Конц. 0°	-2488,3	-327,3	-2535,9	-327,8	-2537,7	-305,4	-1067,7	641,6
Конц. 30°	-2585,6	-361,5	-2618,4	-370,0	-2645,7	-329,2	-1239,7	813,6
Анк.-угл. 70°	-2603,4	-403,7	-2631,3	-393,7	-2631,8	-378,2	-1378,5	949,1

Для каждого рассматриваемого режима и вида опоры определена соответствующая комбинация усилий и получены значения усилий в рассматриваемых элементах первичной схемы. Приложение динамического усилия $F_1=1,3U$ при удалении поясного элемента первым в одном из рассматриваемых сценариев представлено выше (см. Рисунок 1в).

Полученные в ходе анализа усилия в элементах при различных сценариях представлены в таблице выше (см. Таблица 1). Выполнен расчет раскоса и поясного элемента для каждого из пяти режимов с учетом установки диафрагмы в конструкцию опоры. Максимальное усилие в элементе и коэффициенты использования определены как с учётом динамического удара, так и без него (см. Таблица 2).

Таблица 2 - Максимальные усилия и коэффициенты использования

Без динамического удара				С динамическим ударом			
Пояс + (200x14)		Раскос (L180x11)		Пояс (+ 200x14)		Раскос (L180x11)	
U, кН	$k_{исп}$	D, кН	$k_{исп}$	U, кН	$k_{исп}$	D, кН	$k_{исп}$
1АР. Среднеэксплуатационные условия (Т=+5°С, Ветер и гололед отсутствуют)							
-1565,2	0,626	-159,5	0,835	-3014,4	1,205	-441,6	2,311
2АР. Минимальная температура (Т=-45°С, Ветер и гололед отсутствуют)							
-1689,8	0,675	-171,1	0,895	-2745,8	1,097	-352,5	1,844

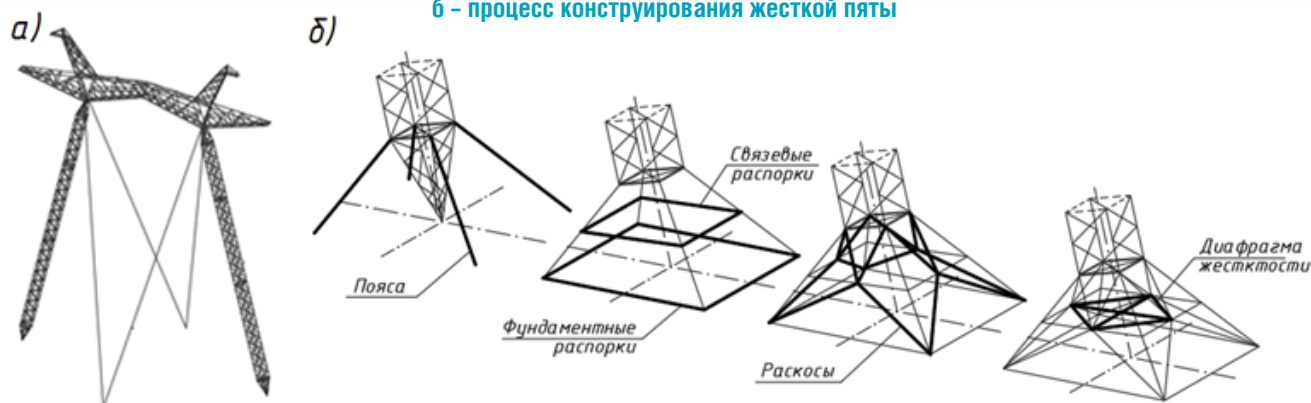
3АР. Гололед ($T=-5^{\circ}\text{C}$, Провода и тросы покрыты гололедом $b_z=15\text{ мм}$)							
-2515,7	1,005	-245,7	1,285	-4087,3	1,634	-527,0	2,758
4МР. Возведение линии ($T=-15^{\circ}\text{C}$, Давление ветра 50 Па, Гололед отсутствует, $0,6T_{\text{max}}$ с одной стороны)							
-1740,2	0,696	-174,0	0,911	-2645,7	1,057	-403,7	2,112
5МР. Ремонт линии ($T=-15^{\circ}\text{C}$, Давление ветра 50 Па, Гололед отсутствует, T_{max} с обеих сторон)							
-2545,8	1,017	-241,8	1,265	-	-	-	-

Анализ приведенных расчётов показывает, что значительные нагрузки и усилия возникают в различных сценариях «вандального» исключения элемента при работе конструкции, но наиболее большие по значению в режимах минимальной температуры и гололедных нагрузок. Вероятность возникновения этих нагрузок мала, поэтому предлагается не рассматривать данные режимы при расчёте на устойчивость свободностоящих решетчатых стальных конструкций опор к ПО. Рекомендовано выполнять расчёты опор ВЛ на ПО на нагрузки и следующих режимов:

- Среднегодовая температура ($t=+5^{\circ}\text{C}$, ветер и гололед отсутствуют);
- Монтажный режим концевой опоры (провода и тросы с одной стороны);
- Монтажный режим анкерно-угловой опоры (провода и тросы с двух сторон).

Одноцепная промежуточная опора для линии электропередачи напряжением 750 кВ представляет собой порталную конструкцию с оттяжками, обеспечивающими геометрическую неизменяемость конструкции в обоих направлениях (см. Рисунок 2а).

Рисунок 2 – Конструкция опоры ВЛ 750 кВ: а – вариант шарнирного опирания опоры; б – процесс конструирования жесткой пяты



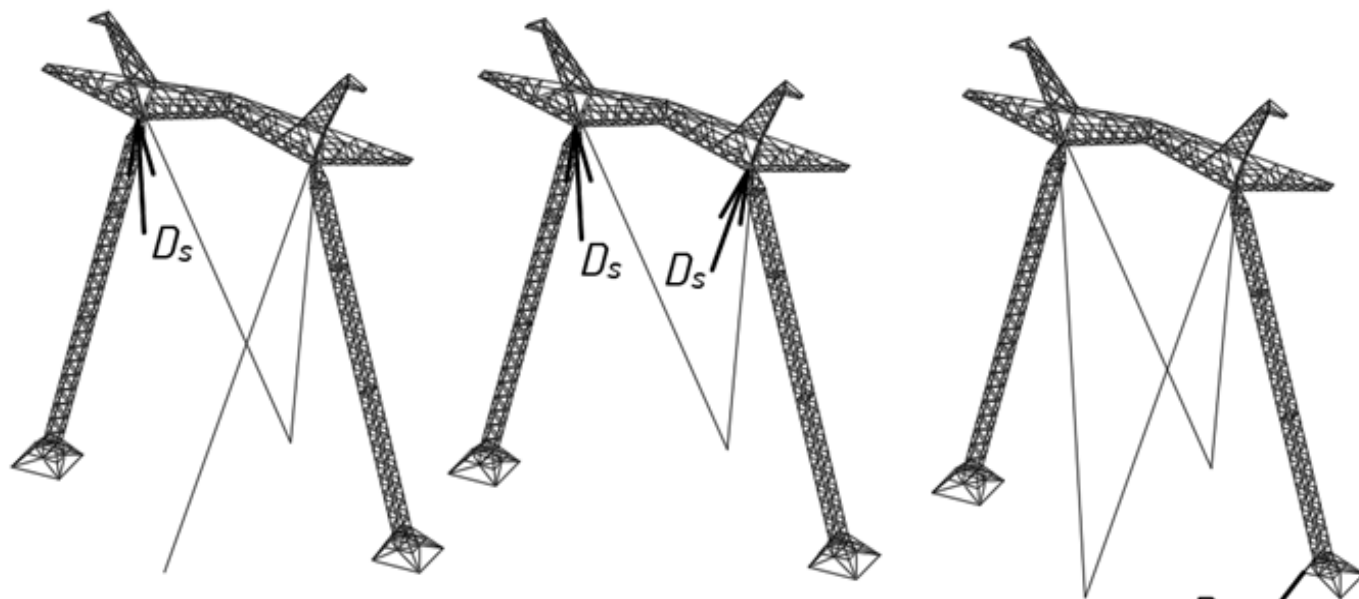
При удалении даже одной из оттяжек система перестает быть геометрически неизменяемой, что приводит к обрушению конструкции.

Одним из вариантов защиты конструкции опоры служит изменение её расчётной схемы: шарнирное сопряжение стоек с фундаментами заменяется на жесткое. С этой целью каждый пояс стойки разводится на одинаковое расстояние от места шарнирного опирания к фундаменту, после этого пояса раскрепляются распорками и раскосами, устанавливается диафрагма жесткости. В итоге получается жесткое основание – пята стойки

(см. Рисунок 2б), которая исключает возможность обрушения при потере несущей способности оттяжки и образует новую конструктивную схему – опору типа ПП750-1-5ПО.

Вторичная схема образуется удалением элемента или узла из первичной схемы в результате локального разрушения, что приводит к следующим вариантам опоры (см. Рисунок 3): без одной оттяжки, без двух оттяжек или без одного узла пяты, состоящего из пяти элементов (пояса, двух раскосов и двух распорок).

Рисунок 3 – Вторичные схемы с динамическими усилиями: в оттяжке D_s , в поясе D_u



Изменение величины ПН в оттяжках, позволяет регулировать величину усилий и перемещений элементов конструкции. Анализ схем производится для величины ПН оттяжек в интервале от 10 до 50 кН для трёх режимов: нормального, аварийного при среднеэксплуатационных условиях,

с приложением динамического усилия, и монтажного – в момент производства ремонтно-восстановительных работ (см. Таблица 3).

Таблица 3 – Максимальные усилия в элементах опоры

Величина ПН T , кН	Максимальное усилие в элементах, кН				Максимальное перемещение тросостойки S , м
	Пояс траверсы	Пояс стойки	Пояс пяты	Раскос пяты	
Нормальный режим (первичная схема)					
10,0	-283,546	-306,952	-171,451	-132,567	0,420
20,0	-284,023	-294,589	-170,806	-132,047	0,375
30,0	-284,833	-262,825	-170,218	-131,789	0,342
40,0	-285,763	-245,911	-169,45	-131,156	0,219
50,0	-286,914	-236,464	-168,753	-130,608	0,185
Аварийный режим (вторичная схема – момент удаления оттяжки)					
10,0	-96,453	-88,217	-48,109	-54,553	0,179
20,0	-108,220	-142,026	-70,660	-79,517	0,320
30,0	-126,114	-207,332	-97,728	-107,564	0,495
40,0	-145,152	-275,118	-125,679	-136,012	0,684
50,0	-164,469	-343,413	-153,811	-170,363	0,873

Монтажный режим (вторичная схема – опора без оттяжки)					
10,0	-95,606	-79,739	-45,416	-49,241	0,118
20,0	-104,544	-125,423	-63,720	-76,947	0,255
30,0	-120,821	-184,09	-80,924	-104,758	0,400
40,0	-139,855	-242,986	-98,677	-132,585	0,546
50,0	-153,788	-301,925	-116,431	-160,415	0,692

Усилия и перемещения получены для каждого рассматриваемого варианта вторичной расчетной схемы, из которых выбраны максимальные.

Подобранные сечения для всех схем определены при величине ПН равного 30 кН и обеспечивающего требуемую жесткость опоры (см. Таблица 4).

Таблица 4 – Подбор сечений элементов для рассматриваемых вариантов схем

Схема опоры	Максимальные усилия в элементах, кН				Максимальное перемещение тросостойки, м
	Подбранное сечение элемента/Козфф. исп-ия				
	Пояс траверсы	Пояс стойки	Пояс пяты	Раскос пяты	
Схема с шарнирным опиранием	-308,635	-212,778	–	–	0,460
	└100x7 0,990	└90x70 0,925	–	–	
Схема с жестким опиранием (первичная)	-284,833	-262,825	-170,218	-131,789	0,342
	└100x7 0,914	└100x7 0,937	└90x6 0,983	└110x7 0,868	
Схемы с жестким опиранием (вторичные)	-126,114	-207,332	-97,728	-84,172	0,657
	–	–	–	–	

Полученные результаты показывают, что выбор оптимальной величины предварительного напряжения должен производиться на основе результата анализа первичных схем при нормальных режимах работы ВЛ и вторичных схем при аварийном и монтажном режимах. При нормальном режиме работы увеличение предварительного напряжения повышает жесткость системы и позволяет удовлетворить требования по ограничению перемещений конструкции, а при аварийном и монтажном режимах приводит к увеличению усилий и росту перемещений, что оказывает негативное влияние на элементы опоры и проведение ремонтных работ.

Вариант жесткого опирания (опора ПП 750-5ПО) рассматриваемой опоры ПП 750-5ЛБ изменяет ее расчетную и конструктивную схему, приводит к увеличению сечений элементов стоек и дополнительному расходу стали на конструкцию жесткой пяты. Металлоемкость в среднем возрастает на 1,5 т, составляя приблизительно 12% от металлоемкости опоры, при этом увеличиваются количество и материалоемкость фундаментов.

Учитывая повышенные затраты на возведение опоры ПП 750-5ПО, устойчивой к прогрессирующему обрушению, рекомендуется применять ее

для районов с повышенным уровнем вандализма, что позволит сократить экономический ущерб от неблагоприятных последствий и обеспечить возможность нормального функционирования ВЛ. ■

ФГБОУ ВО «СПбГАСУ»
Санкт-Петербург
+7 (812) 575-05-34
www.spbgasu.ru

Контакты автора:
Филимонов А.С.:
Sanya328kms@yandex.ru
+7 (953) 342-40-32

Список литературы:

1. Правила устройства электроустановок. ПУЭ. Издание седьмое. [Электронный ресурс] – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294849/4294849522.htm> (дата обращения 09.06.2021);
2. СП 296.1325800.2017 Здания и сооружения. Особые воздействия (с Изменением N 1). [Электронный ресурс] – URL: <https://docs.cntd.ru/document/555600219> (дата обращения: 09.06.2021);
3. СП 385.1325800.2018 Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения (с Изменением N 1). [Электронный ресурс] – URL: <http://docs.cntd.ru/document/551394640> (дата обращения 09.06.2021);