



Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

Кафедра металлических и деревянных конструкций

XI МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«ОПОРЫ И ФУНДАМЕНТЫ ДЛЯ ВЛ:
ТЕХНОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И СТРОИТЕЛЬСТВА»

Линейная вантово-стержневая модель для расчёта конструкций, проводов и тросов ВЛ 35-750 кВ

МАГИСТР:

ФИЛИМОНОВ АЛЕКСАНДР СЕРГЕЕВИЧ

ДОЦЕНТ КМДК СПБГАСУ, К.Т.Н.

СЕНЬКИН НИКОЛАЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

26-28 ИЮНЯ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ 2024

1. Введение

Ко всем строительным объектам, включая опоры воздушных линий электропередачи, предъявляются требования надежности, подразумевающие под собой их способность выполнять определенные функции на протяжении расчетного срока эксплуатации в соответствии с ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований». Выполнение таких требований позволяет практически бесперебойно обеспечивать их функционирование, обмен ресурсами, осуществлять транспортные функции, поддерживать нормальные условия для ведения бытовой и деловой деятельности. В процессе использования зданий и сооружений обязательно должна быть обеспечена безопасность людей, которая достигается совокупностью принимаемых мер, в том числе и на проектной стадии.

Выход из строя конструкции может произойти как из-за допущенных ошибок человеком или неучтенных воздействий природного характера, так и путём совершения умышленных действий, производимых в корыстных целях: вандализм, встречающийся по отношению к опорам воздушных линий электропередачи, преследует цель обогащения и приводит к разрушению достигаемых элементов опоры. Начальное локальное разрушение может привести не только к полному обрушению самой опоры, но и стать причиной обрушения нескольких опор на участке линии ВЛ.

Для защиты конструкции от обрушения на стадии проектирования должны быть выполнены специальные мероприятия и произведён расчет на ПО, что является обязательным условием для зданий и сооружений повышенного уровня ответственности класса КС-3.

2. ПО: Требования нормативно-технических документов

1. ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» №384-ФЗ.

2. ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения»

При проектировании здания или сооружения повышенного уровня ответственности должны быть учтены аварийные расчетные ситуации, приводящие к предельным состояниям, возникающим при взрыве, столкновении, аварии, пожаре, а также после отказа одной из несущих конструкций.

3. СП 385.1325800.2018 «Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения».

Разработанный и введенный в июне 2019 г свод правил содержит основные положения и общие требования к расчёту и проектированию защиты зданий и сооружений от ПО при аварийной расчетной ситуации. Изменение №1 данного документа, введенное в мае 2020 г, ограничивает его область применения, которая больше не распространяется на проектирование линейных объектов.

Недостаточность существующей нормативной документации, а также актуальная потребность в проведении расчета на устойчивость линейного объекта к ПО позволяет на научно-исследовательском уровне применить основные принципы и положения СП.

3. Аварийные режимы работы опор ВЛ

В соответствии с п. 2.5.72 ПУЭ-7 (Правила устройства электроустановок) расчёт по аварийному режиму работы ВЛ производится для сочетания следующих условий:

1. Среднегодовая температура ($t_{с2}=+5^{\circ}\text{C}$, ветер и гололед отсутствуют);
2. Низшая температура ($t_{-}=-45^{\circ}\text{C}$, ветер и гололед отсутствуют);
3. Провода и тросы покрыты гололедом ($t_2=-5^{\circ}\text{C}$, $b_3=15$ мм);
4. Расчетная нагрузка от максимального тяжения проводов T_{max} .

В соответствии с п. 2.5.141 ПУЭ-7. Промежуточные опоры ВЛ с поддерживающими гирляндами изоляторов и глухими зажимами должны рассчитываться в аварийном режиме по первой группе предельных состояний на расчетные условные горизонтальные статические нагрузки $T_{ав}$.

Расчет производится при следующих условиях:

- оборваны провод или провода одной фазы одного пролета (при любом числе проводов на опоре), тросы не оборваны;
- оборван один трос пролета (для расщепленного троса - все его составляющие), провода не оборваны.

3.1 Условные горизонтальные статические нагрузки

В соответствии с п. 2.5.142 ПУЭ-7 расчетная условная горизонтальная статическая нагрузка $T_{ав}$ **от проводов** на опоры принимается равной: для линии ВЛ с нерасщепленными фазами и для свободностоящих металлических опор, опор из любого материала на оттяжках, А-образных и других типов жестких опор с проводами площадью сечения алюминиевой части до 185 мм^2 - **$0,5T_{max}$** , площадью сечения алюминиевой части 205 мм^2 и более – **$0,4T_{max}$** .

В соответствии с п. 2.5.142 ПУЭ-7 расчетная условная горизонтальная статическая нагрузка $T_{ав}$ **от одиночного троса** на опоры принимается равной **$0,5T_{max}$** .

В расчетах допускается учитывать поддерживающее действие необорванных проводов и тросов при среднегодовой температуре без гололеда и ветра. При этом механические напряжения, возникающие в поддерживающих проводах и тросах, не должны превышать 70 % их разрывного усилия.

4. Линия ВЛ как единая система проводов и тросов при их обрыве

Задача обрыва провода в одном из пролетов была решена уже в 50-х годах прошлого века. В такой задаче рассматривается участок линии между анкерными опорами, имеющий пять одинаковых пролётов, где анкерным опорам провода крепятся натяжными гирляндами изоляторов, почти совпадающие с кривой провисания провода, а к промежуточным – вертикальными гирляндами. Решение данной задачи и подобных ей предполагает графический метод, предложенный академиком К.И. Шенфером.

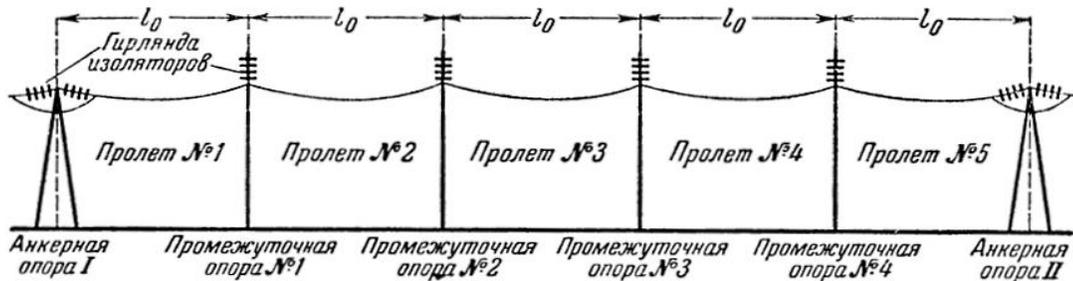


Рисунок 4.1 – Схема работы линии при необорванных проводах

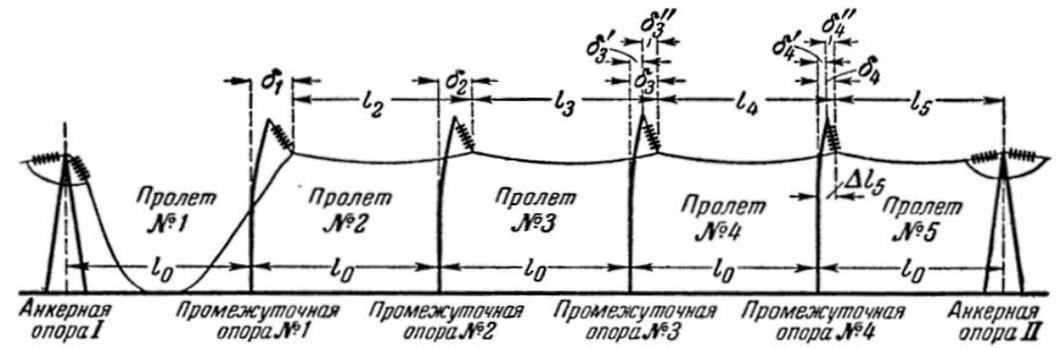


Рисунок 4.2 – Схема работы линии при обрыве провода

4.1 Обрыв единственного провода на линии

Задача была решена при помощи современного табличного процессора MS Excel, который позволяет автоматизировать расчёт и выполнить его, применяя метод итераций.

Таблица 4.1 – Изменение тяжения в проводе при его обрыве

	Тяжение до обрыва T_0 , кг	Тяжение в пролёте T_n , кг (аналитически)	Тяжение в пролёте T_n , кг (графически)	Отклонение δ , %
Пролёт №1	1328,900	Обрыв	Обрыв	–
Пролёт №2	1328,900	484,006	480,000	0,008
Пролёт №3	1328,900	682,871	700,000	-0,024
Пролёт №4	1328,900	785,551	790,000	-0,006
Пролёт №5	1328,900	831,151	840,000	-0,011

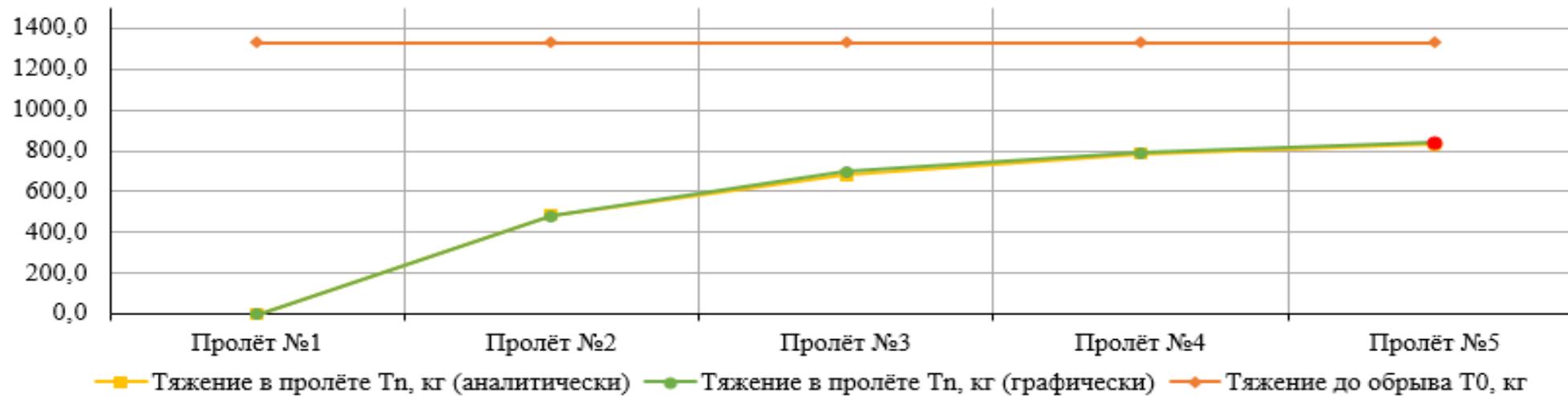


Рисунок 4.3 – Усилие тяжения T , кг в проводе при его обрыве в пролёте №1

4.2 Обрыв провода или троса на одноцепной линии 330 кВ

Рассматриваемая линия состоит из анкерно-угловых опор У330н-1+14 и промежуточных П330н-1 (см. рис. 4.4). Используются провода марки АС 300/66 и грозотросы марки 11.0-МЗ-В-ОЖ-Н-Рб. В качестве поддерживающих изолирующих подвесок для проводов использованы гирлянды изоляторов из стекла длиной 3,1 м и массой 140 кг, а для грозотросов – длиной 0,7 м и массой 30 кг.

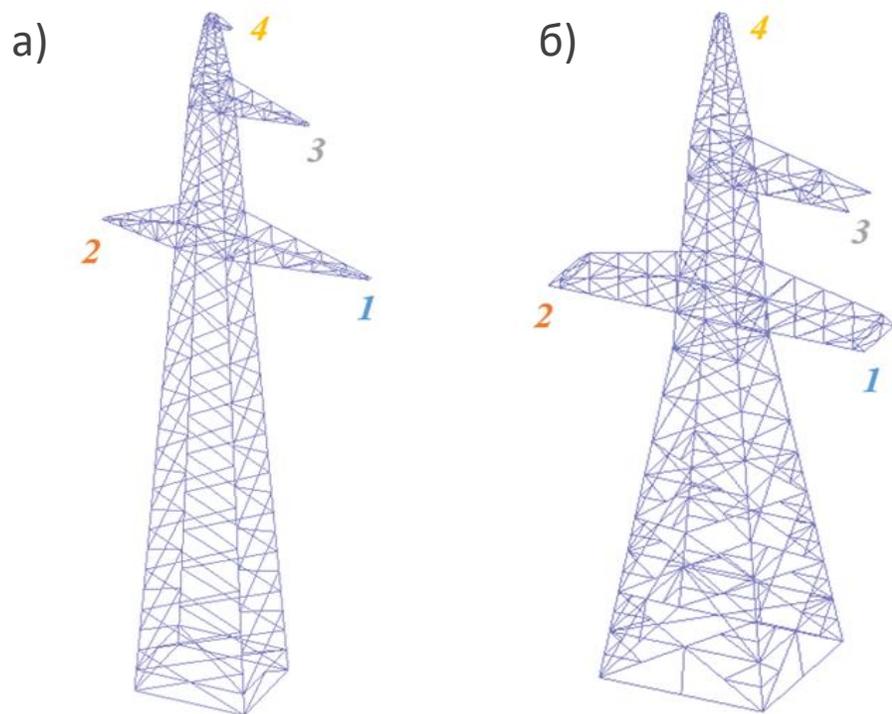


Рисунок 4.4 – Опоры ВЛ 330кВ: а) Промежуточная опора П330н-1, б) Анкерно-угловая опора У330н-1+14

Составленная математическая модель для расчёта участка линии позволяет задать требуемое количество пролетов, выбрать обрыв провода или троса в любом из них и установить любые опоры, задав их матрицами жесткости.

Проведение численного эксперимента для участка линии из 21 пролёта при последовательном обрыве каждого провода и троса в XI пролёте показывает (см. табл. 4.2), что наибольший интерес представляет наибольшее изменение усилия тяжения, которое наблюдается в грозотросе после обрыва провода №3 и составляет 2,57% (см. рис. 4.6).

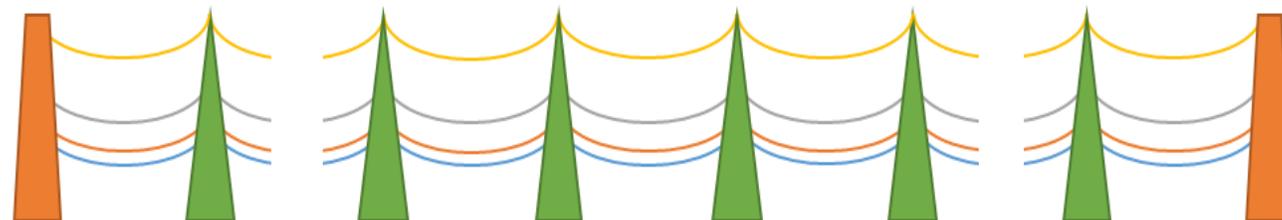


Рисунок 4.5 – Схематичное представление линии ВЛ 330 кВ

4.2 Обрыв провода или троса на одноцепной линии 330 кВ

Таблица 4.2 – Изменение усилий тяжения в проводах и тросах при их обрыве

		Обрыв провода или троса в пролёте				
		VII	VIII	IX	X	XI
Начальное тяжение провода №1, кг		5034,60	5034,60	5034,60	5034,60	5034,60
Тяжение в проводе №1 после обрыва T_0 , кг	Провода №1	4304,60	3541,17	0,00	3541,17	4304,60
	Провода №2	5034,32	5034,55	5035,40	5034,55	5034,32
	Провода №3	5030,42	5033,50	5067,74	5033,50	5030,42
	Грозотроса	5031,38	5031,55	5055,96	5031,55	5031,38
Изменение тяжения в проводе №1 после обрыва $(T_0-T_n)/T_n$, %	Провода №1	-14,50%	-29,66%	-100,00%	-29,66%	-14,50%
	Провода №2	-0,006%	-0,001%	0,016%	-0,001%	-0,006%
	Провода №3	-0,083%	-0,022%	0,658%	-0,022%	-0,083%
	Грозотроса	-0,064%	-0,061%	0,424%	-0,061%	-0,064%
Начальное тяжение провода №2, кг		5034,60	5034,60	5034,60	5034,60	5034,60
Тяжение в проводе №2 после обрыва T_0 , кг	Провода №1	5034,39	5034,60	5035,44	5034,60	5034,39
	Провода №2	4309,67	3549,88	0,00	3549,88	4309,67
	Провода №3	5032,90	5034,20	5047,72	5034,20	5032,90
	Грозотроса	5031,86	5031,96	5053,10	5031,96	5031,86
Изменение тяжения в проводе №2 после обрыва $(T_0-T_n)/T_n$, %	Провода №1	-0,004%	0,000%	0,017%	0,000%	-0,004%
	Провода №2	-14,40%	-29,49%	-100,00%	-29,49%	-14,40%
	Провода №3	-0,034%	-0,008%	0,261%	-0,008%	-0,034%
	Грозотроса	-0,055%	-0,052%	0,367%	-0,052%	-0,055%
Начальное тяжение провода №3, кг		5034,60	5034,60	5034,60	5034,60	5034,60
Тяжение в проводе №3 после обрыва T_0 , кг	Провода №1	5030,31	5033,40	5067,60	5033,40	5030,31
	Провода №2	5032,72	5034,06	5047,56	5034,06	5032,72
	Провода №3	4298,78	3531,44	0,00	3531,45	4298,78
	Грозотроса	5028,77	5029,06	5073,74	5029,06	5028,77
Изменение тяжения в проводе №3 после обрыва $(T_0-T_n)/T_n$, %	Провода №1	-0,085%	-0,024%	0,655%	-0,024%	-0,085%
	Провода №2	-0,037%	-0,011%	0,257%	-0,011%	-0,037%
	Провода №3	-14,62%	-29,86%	-100,00%	-29,86%	-14,62%
	Грозотроса	-0,116%	-0,110%	0,777%	-0,110%	-0,116%
Начальное тяжение грозотроса T , кг		3356,14	3356,14	3356,14	3356,14	3356,14
Тяжение в грозотросе после обрыва T_0 , кг	Провода №1	3349,84	3346,50	3402,75	3346,50	3349,84
	Провода №2	3350,70	3347,72	3396,32	3347,72	3350,70
	Провода №3	3344,66	3338,72	3442,50	3338,72	3344,66
	Грозотроса	3242,76	2925,10	0,00	2925,10	3242,76
Изменение тяжения в грозотросе после обрыва $(T_0-T_n)/T_n$, %	Провода №1	-0,188%	-0,287%	1,389%	-0,287%	-0,188%
	Провода №2	-0,162%	-0,251%	1,197%	-0,251%	-0,162%
	Провода №3	-0,342%	-0,519%	2,573%	-0,519%	-0,342%
	Грозотроса	-3,38%	-12,84%	-100,00%	-12,84%	-3,38%

4.2 Обрыв провода или троса на одноцепной линии 330 кВ

Усилия тяжения для всех проводов и тросов при обрыве провода №3 в пролёте XI представлено ниже (см. рис. 4.6).

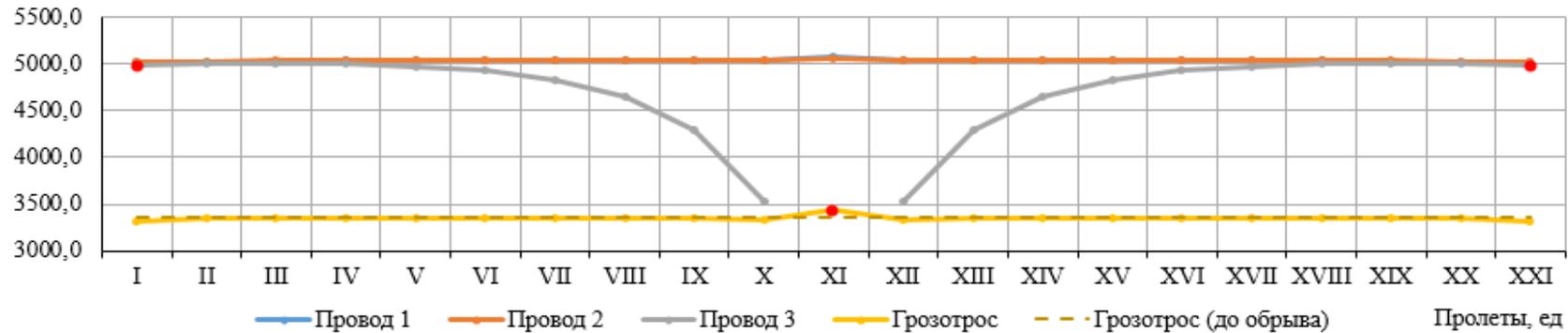


Рисунок 4.6 – Усилия тяжения Т, кг в проводах и грозотросе при обрыве провода №3

Динамика изменения усилий тяжения в проводе №3 при его последовательном обрыве в пролётах с I по VI и в среднем XI пролете представлена соответствующей ломаной линией на графике ниже (см. рис. 4.7).

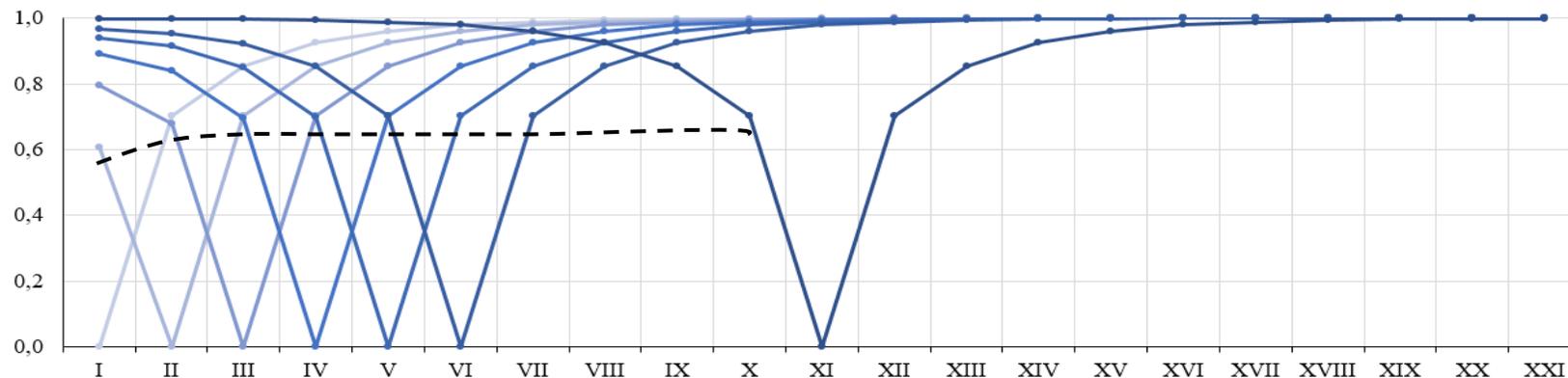


Рисунок 4.7 – Усилия тяжения Т в проводах и грозотросе при обрыве провода №3

4.2 Обрыв провода или троса на одноцепной линии 330 кВ

Результаты показывают, что горизонтальное статическое усилие на опору достигает своего максимума при наибольшем пролёте и использовании марки провода АС-240/32 и составляет $0,894T_{n, \max}$ (см. табл. 4.2). В соответствии с ПУЭ-7 расчётная условная горизонтальная статическая нагрузка принимается равной $T_{ав} = 0,4T_{\max} = 0,4 \cdot 1,3T_{n, \max} = 0,52T_{n, \max}$

Таблица 4.3 – Изменение собственных усилий тяжения в проводах и грозотросах при обрыве провода №3

Пролёт, м	150	225	300	375	450
Провод марки АС-240/32					
Провод №1	-0,24%	-0,44%	-0,57%	-0,60%	-0,55%
Провод №2	-0,09%	-0,17%	-0,22%	-0,24%	-0,22%
Провод №3	46,78%	64,76%	76,57%	84,33%	89,43%
Грозотрос	-1,17%	-1,06%	-1,60%	-2,05%	-1,61%
Провод марки АС-300/66					
Провод №1	-0,23%	-0,47%	-0,68%	-0,81%	-0,83%
Провод №2	-0,09%	-0,19%	-0,27%	-0,32%	-0,33%
Провод №3	39,72%	57,72%	70,14%	78,79%	84,82%
Грозотрос	-1,47%	-2,66%	-3,09%	-2,79%	-2,21%
Провод марки АС-500/64					
Провод №1	-0,26%	-0,50%	-0,77%	-0,98%	-1,09%
Провод №2	-0,10%	-0,20%	-0,31%	-0,39%	-0,43%
Провод №3	37,65%	52,55%	65,05%	74,14%	80,77%
Грозотрос	-1,74%	-3,35%	-3,26%	-3,62%	-2,90%

Усилия на участке ВЛ после обрыва провода №3 с учётом поддерживающего действия проводов. (см. рис. 4.8)

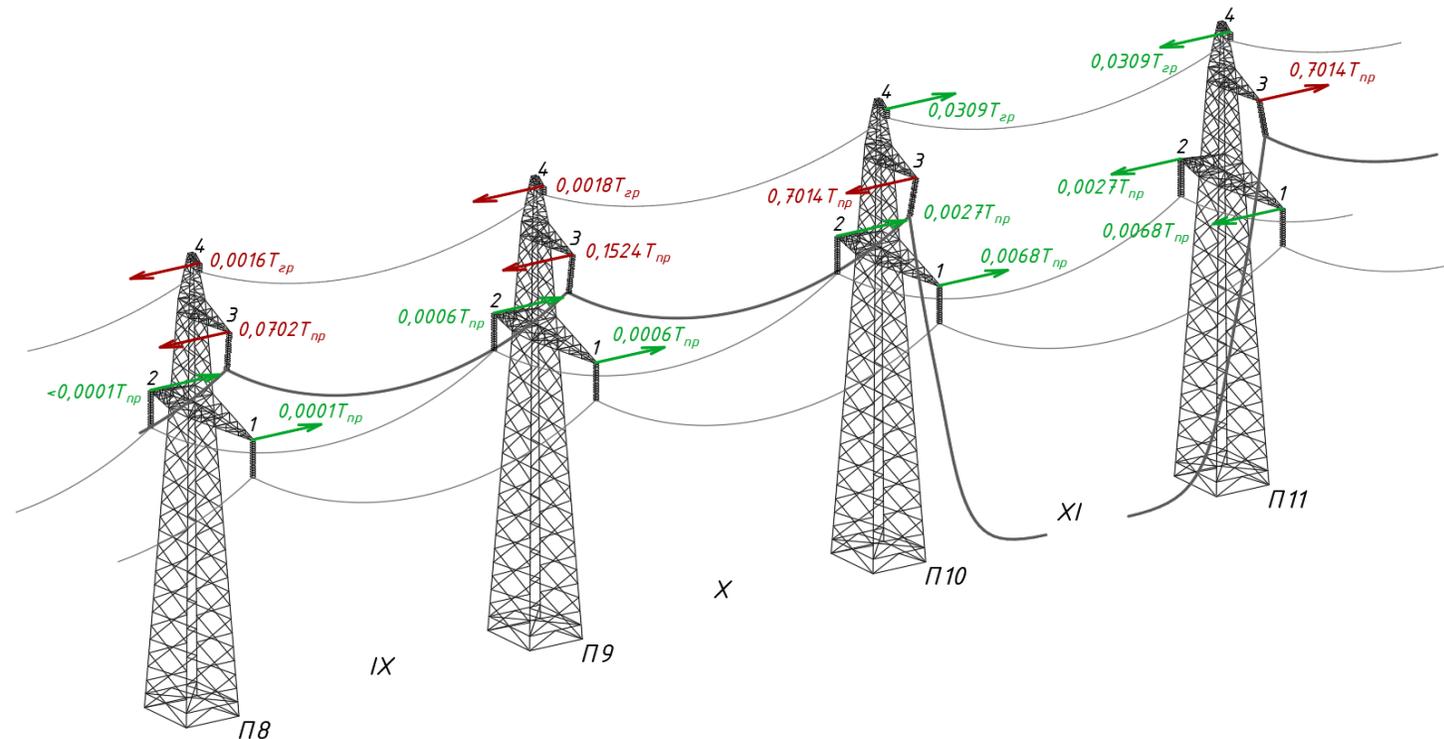


Рисунок 4.8 – Действующие на опоры усилия после обрыва провода №3 (АС300/66)

5. Линия ВЛ как единая система проводов и тросов при падении опоры



Рисунок 5.1 – Разрушенная промежуточная опора ВЛ 110 кВ вследствие потери устойчивости сжатого пояса под нижней траверсой



Рисунок 5.2 – Упавшая промежуточная опора вследствие потери несущей способности свай при выдергивании

5.1 Падение опоры на одноцепной линии 330 кВ

Модель падения опоры предполагает её движение перпендикулярно оси прохождения ВЛ (см. рис. 5.3). Расчёты представлены для положения опоры от 54° до 78° с шагом в 3° . Важным моментом является условие крепления провода или грозотроса в зажиме, который на соседней промежуточной опоре выключается из работы и перестаёт препятствовать перемещению провода каждый раз при достижении им ограничивающего усилия заделки. В соответствии с ГОСТ Р 51177-2017 ограничивающее усилие заделки для стальных тросов должно составлять не менее 5% от разрывного усилия равного в данном случае 154,8 кН, поэтому для расчёта значение принято равным 20кН, что составляет 12,9% и приводит к следующим результатам (см. Рис. 5.4 и Рис. 5.5).

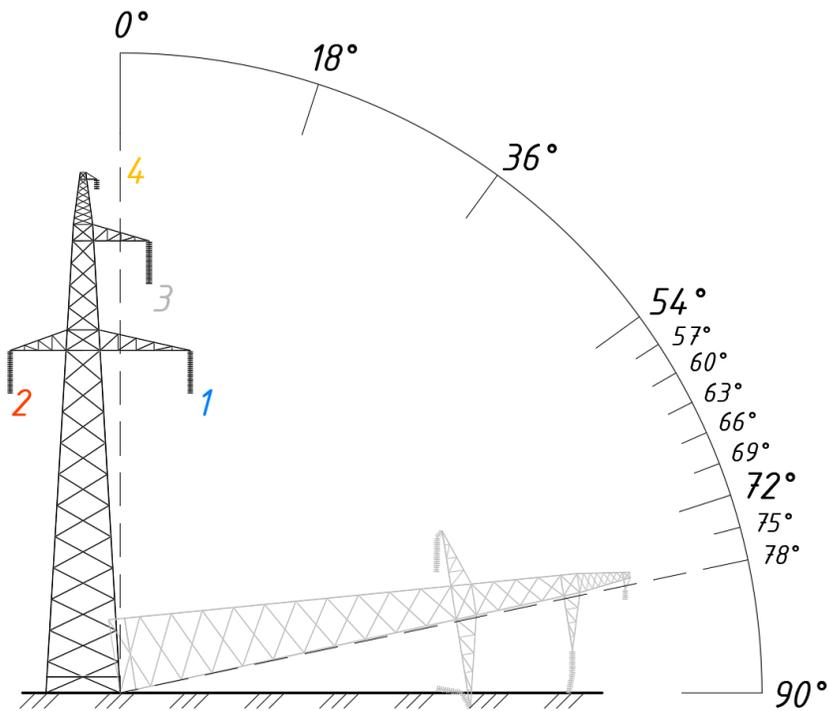


Рисунок 5.3 – Схема падения промежуточной опоры П330Н-1

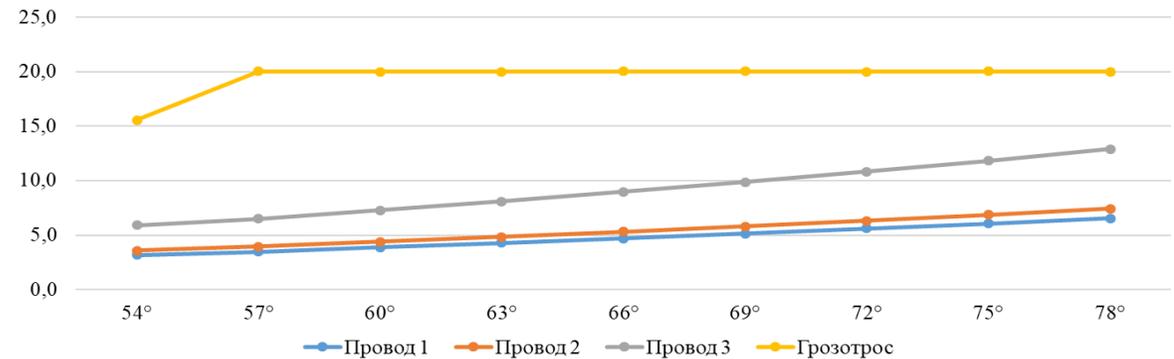


Рисунок 5.4 – Усилия на соседнюю промежуточную опору от тяжения проводов и тросов с учётом работы зажима, кН

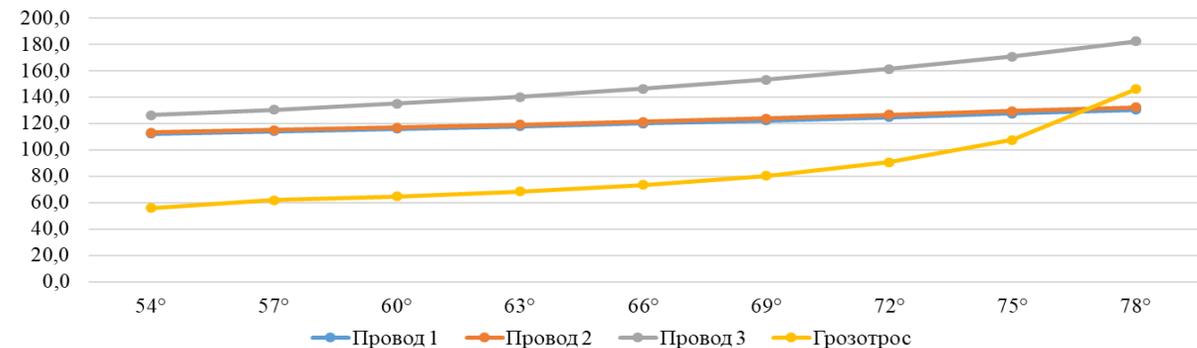


Рисунок 5.5 – Усилия тяжения в проводах и тросах при падении опоры с учётом работы зажима, кН

5.1 Падение опоры на одноцепной линии 330 кВ

Несмотря на работу зажима и соответствующее продёргивание грозотроса в нём, усилие в грозотросе выросло до значения 146,1 кН, что может стать причиной его обрыва, а соответственно возможны два варианта падения опоры: с обрывом грозотроса и без него (Рис. 8 и Рис. 9). Векторы усилий, действующих на опору вдоль оси ВЛ и перпендикулярно ей представлены относительно первоначальных тяжений в проводах и тросах.

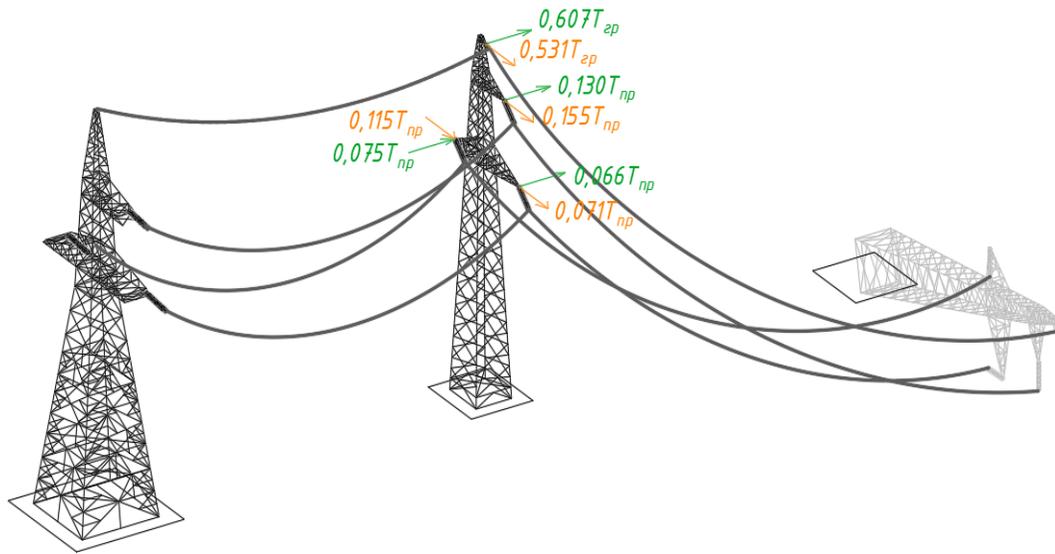


Рисунок 5.6 – Усилия в промежуточной опоре от тяжения проводов при падении опоры без обрыва грозотроса

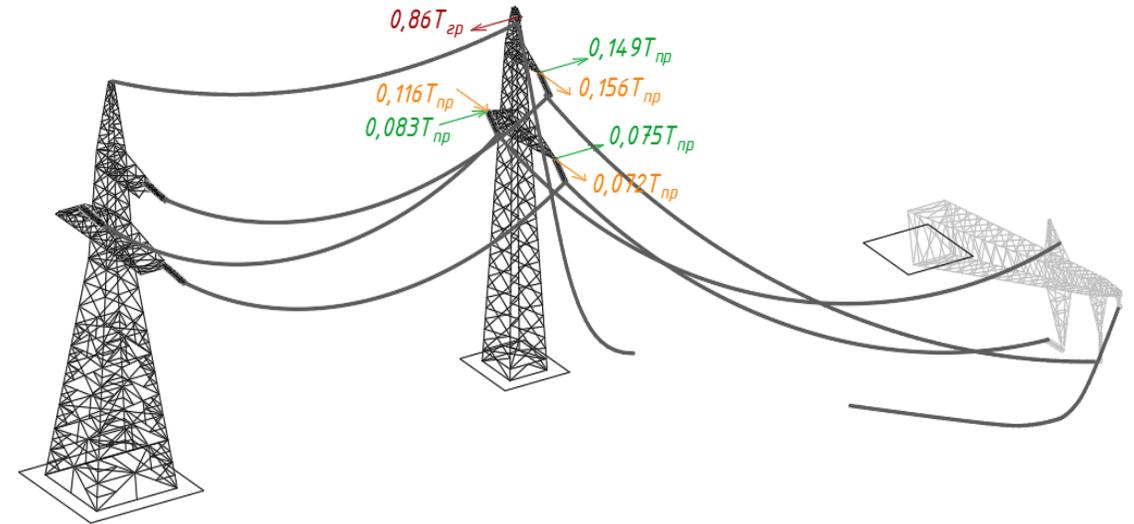


Рисунок 5.7 – Усилия в промежуточной опоре от тяжения проводов при падении опоры с обрывом грозотроса

5.1 Падение опоры на одноцепной линии 330 кВ

Результаты расчёта получены и для других вариантов, где параметрами являются длина пролёта и марка подвешиваемого провода при неизменной марке грозотроса (см. Табл. 5.1).

Таблица 5.1 – Усилия тяжения в проводах и тросах в пролёте с обрушенной опорой и с усилиями на соседнюю опору

Длина пролёта L, м	Элемент системы	Провод 1	Провод 2	Провод 3	Грозотрос
Провод марки АС-240/32					
150	Начальное тяжение		67,4		34,1
	Конечное тяжение	–	–	–	–
	Усилие на опору	–	–	–	–
300	Начальное тяжение		67,4		32,9
	Конечное тяжение	80,4	81,3	95,0	146,9*
	Усилие на опору	5,0	5,6	9,9	20,0*
450	Начальное тяжение		67,1		32,6
	Конечное тяжение	70,1	70,3	72,6	40,1
	Усилие на опору	2,3	2,5	4,3	6,7
Провод марки АС-300/66					
150	Начальное тяжение		100,0		34,1
	Конечное тяжение	–	–	–	–
	Усилие на опору	–	–	–	–
300	Начальное тяжение		98,8		32,9
	Конечное тяжение	130,4	132,4	182,3	146,1*
	Усилие на опору	6,6	7,4	12,9	20,0*
450	Начальное тяжение		98,4		32,6
	Конечное тяжение	104,7	214,1	557,8	143,8
	Усилие на опору	3,9	4,4	7,4	6,6
Провод марки АС-500/64					
150	Начальное тяжение		124,8		34,1
	Конечное тяжение	–	–	–	–
	Усилие на опору	–	–	–	–
300	Начальное тяжение		137,0		32,9
	Конечное тяжение	210,1	214,2	557,8	143,8*
	Усилие на опору	7,9	9,0	15,7	20,0*
450	Начальное тяжение		136,5		32,6
	Конечное тяжение	147,9	148,8	158,2	40,0
	Усилие на опору	5,6	6,3	10,5	6,6

5.2 Падение опоры на двучепной линии 110 кВ

Рассматриваемая линия состоит из промежуточных опор П110-6 (см. рис. 5.8). Используются провода марки АС 240/32 и грозотросы марки 11.0-МЗ-В-ОЖ-Н-Рб. В качестве поддерживающих изолирующих подвесок для проводов использованы гирлянды изоляторов из стекла длиной 1,2 м и массой 60 кг.

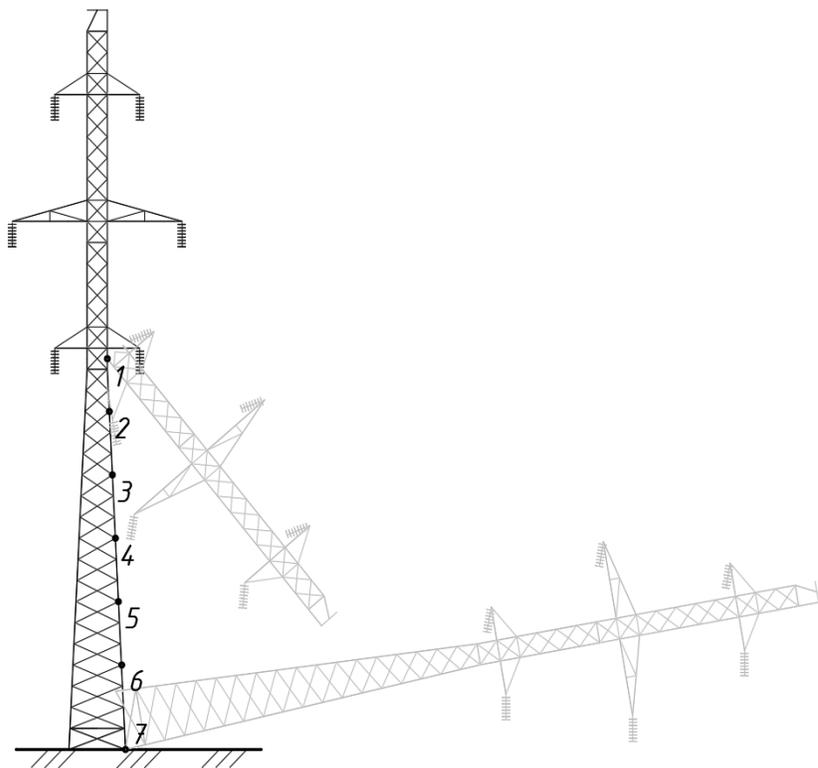


Рис. 5.8 – Схема падения промежуточной опоры П110-6

Разрушение промежуточной опоры П110-6 (см. рис. 5.8) может произойти в любой части ствола опоры, поэтому для каждого конечного положения опоры при расположении шарнира от точки 1 к точке 7 определены зависимости роста усилий. В первом случае применяются глухие зажимы (см. рис. 5.9), а во втором – зажимы ограниченной прочности (см. рис. 5.10).

В соответствии с ГОСТ Р 51177-2017 ограничивающее усилие заделки для стальных тросов должно составлять не менее 5% от разрывного усилия равного 154,8 кН (в соответствии с СТО 71915393-ТУ 062–2008 при маркировочной группе 1860 Н/мм²), что составляет не менее 7,74 кН, а для проводов марки АС300/66 не менее 10% от разрывного усилия равного 117,52 кН что составляет не менее 11,75 кН.

5.2 Падение опоры на двучепной линии 110 кВ

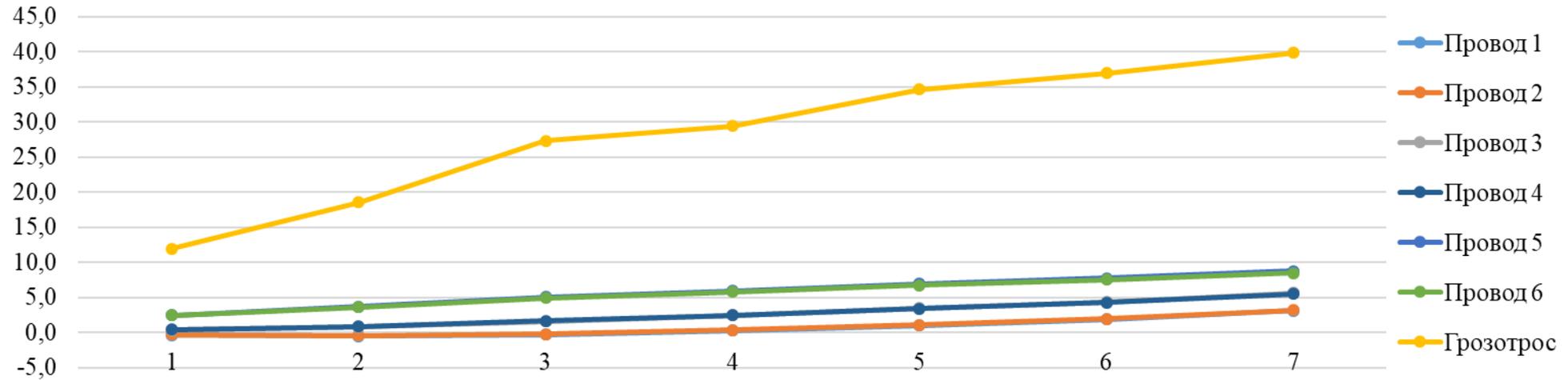


Рис. 5.9 – Усилия на соседнюю промежуточную опору при положении условного шарнира падающей опоры в точке 7 и применении глухих зажимов, кН

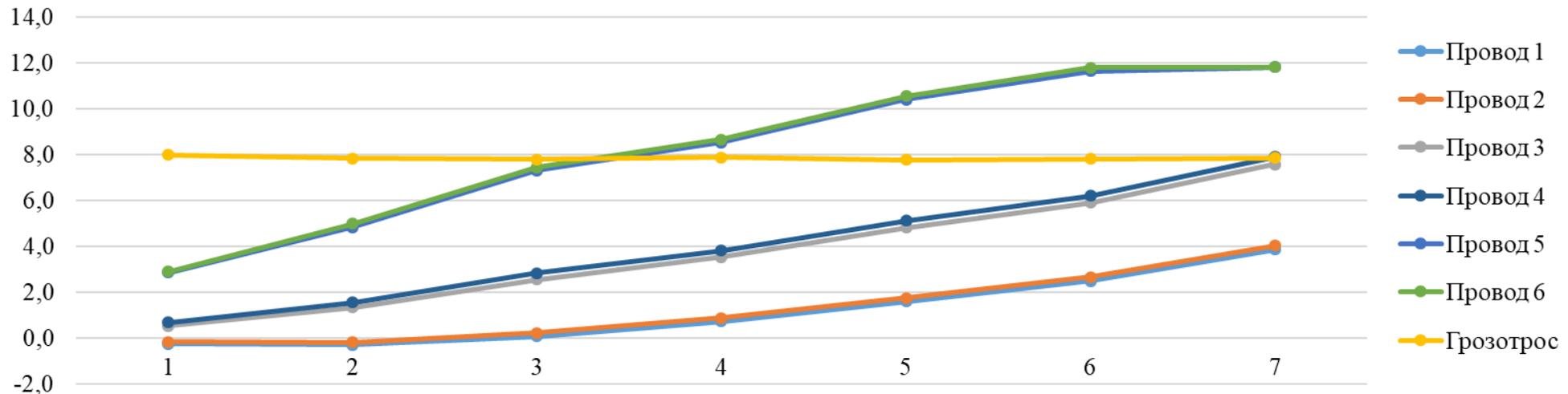


Рис. 5.10 – Усилия на соседнюю промежуточную опору при положении условного шарнира падающей опоры в точке 7 и применении зажимов ограниченной прочности заделки, кН

6. Падение опоры на двучепной линии 110 кВ и обрушение соседней

Более подробно рассмотрен наихудший вариант падения опоры с условным шарниром в точке 7 (см. рис. 5.11), при котором на соседнюю промежуточную опору будут действовать усилия представленные ниже (см. рис. 5.12). Пунктирной линией и цифрами с засечкой показаны величины усилий при применении глухих зажимов в соответствующих проводах (1' – 6') и грозотросе (0'), сплошной линией, при зажимах с ограниченной прочностью заделки.

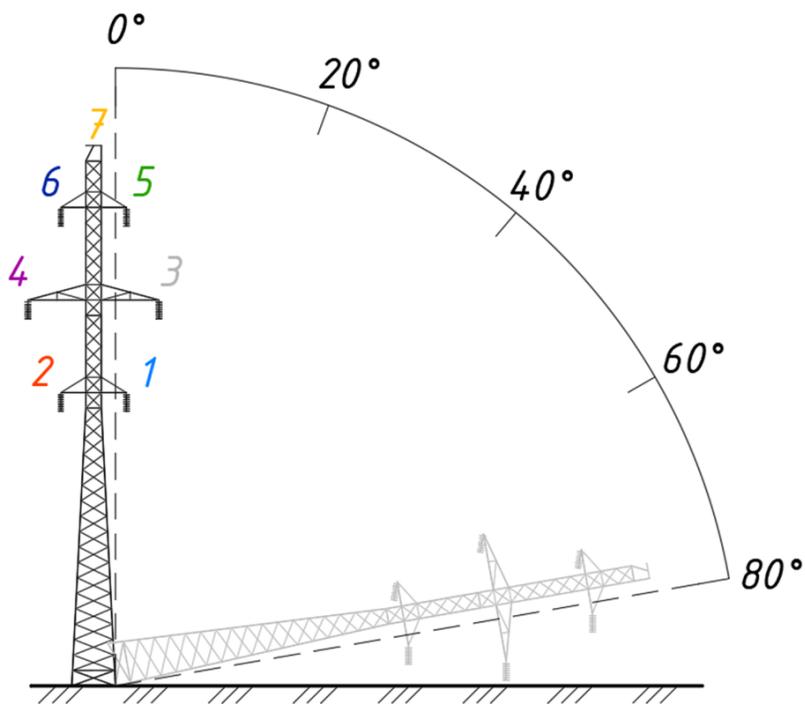


Рисунок 6.1 – Схема падения промежуточной опоры ПЗ30н-1

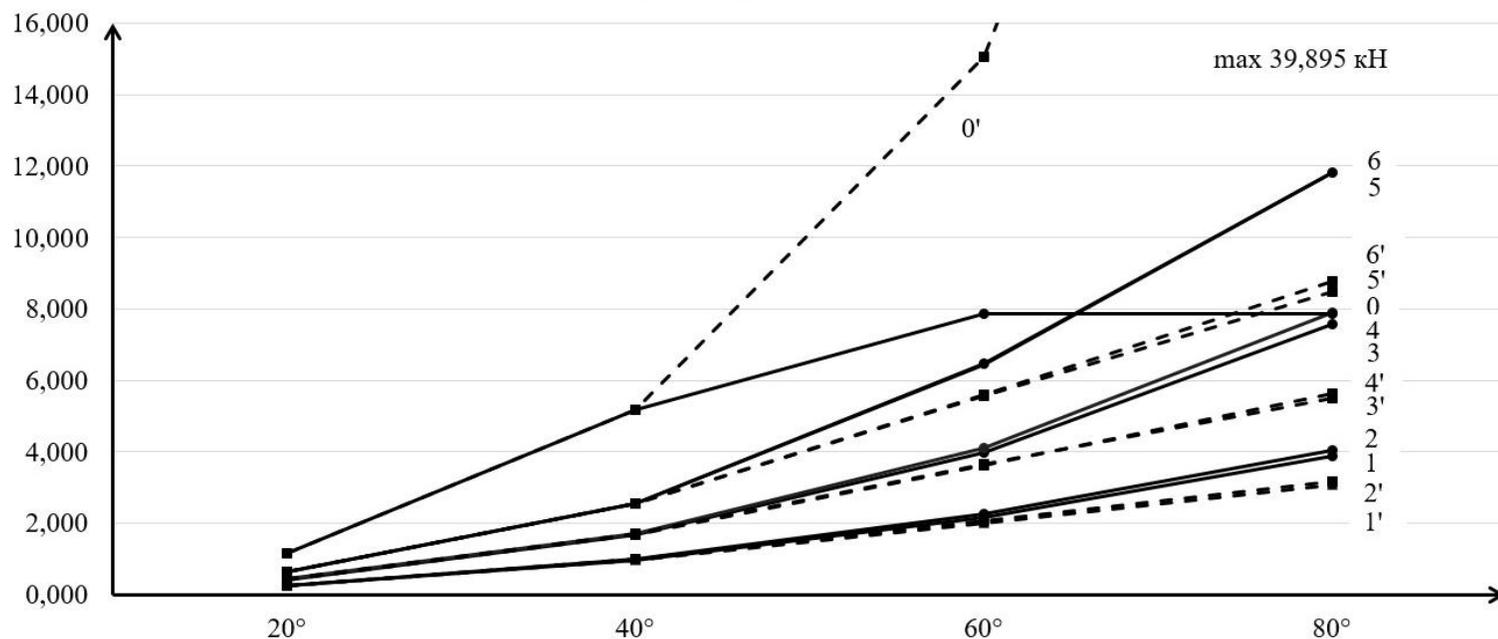


Рисунок 6.2 – Усилие от проводов и тросов на промежуточную опору при падении соседней опоры, кН (провод марки АС300/66)

6. Падение опоры на двучепной линии 110 кВ и обрушение соседней

Расчёт показывает, что даже при применении зажимов с ограниченной прочностью заделки, воздействующие на опору усилия через провода и грозотрос в гололёдном режиме приведут к её обрушению, так как не обеспечена несущая способность поясных элементов ствола опоры.

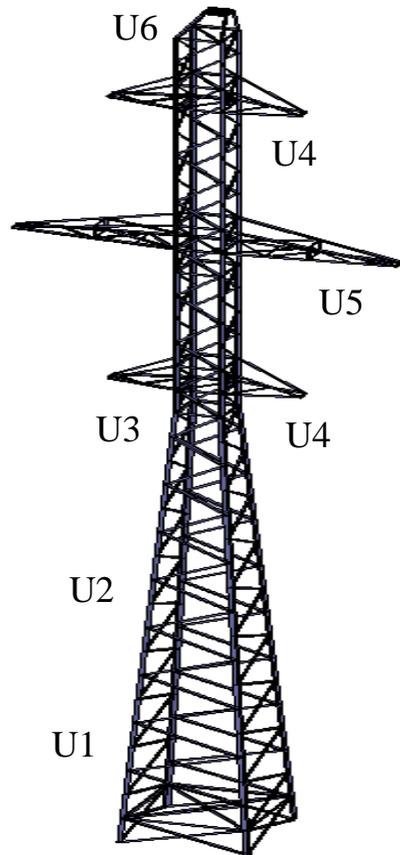


Рисунок 6.3 – Расчётная схема опоры П110-6

Таблица 6.1 – Коэффициенты несущей способности элементов промежуточной опоры при падении соседней опоры и применении зажимов с ограниченной прочностью заделки

Элемент	Сечение	Основная расчётная схема	Положение падающей опоры				
			Зажим с ограниченной прочностью заделки				Глухой зажим
			20°	40°	60°	80°	
Провод марки АС300/66							
Пояс U1	└ 110x8	0,783	0,397	0,740	1,165	1,625	2,171
Пояс U2	└ 110x8	0,717	0,393	0,741	1,170	1,620	2,357
Пояс U3	└ 90x7	0,809	0,508	0,980	1,551	2,136	3,208
Пояс нижней траверсы U4	└ 63x5	0,392	0,418	0,441	0,476	0,524	0,488
Пояс средней траверсы U5	└ 63x5	0,710	0,728	0,782	0,877	1,024	0,923
Пояс верхней траверсы U4	└ 63x5	0,392	0,430	0,490	0,601	0,748	0,655
Стойка грозотроса U6	└ 63x5	0,145	0,149	0,147	0,153	0,171	0,463
Провод марки АС240/32							
Пояс U1	└ 110x8	0,783	0,329	0,595	0,886	1,223	1,891
Пояс U2	└ 110x8	0,717	0,325	0,613	0,909	1,242	2,135
Пояс U3	└ 90x7	0,809	0,429	0,817	1,213	1,654	2,931
Пояс нижней траверсы U4	└ 63x5	0,392	0,361	0,374	0,396	0,427	0,394
Пояс средней траверсы U5	└ 63x5	0,710	0,628	0,660	0,720	0,814	0,731
Пояс верхней траверсы U4	└ 63x5	0,392	0,368	0,404	0,473	0,579	0,486
Стойка грозотроса U6	└ 63x5	0,145	0,148	0,145	0,154	0,171	0,513

7. Программа для выполнения соответствующих расчётов

Программа позволяет выполнять расчёты, связанные с работой участка воздушной линии электропередачи в аварийном режиме: обрыв провода или грозотроса, обрыв гирлянды изоляторов или разрушение одной из промежуточных опор. Выполненный расчёт позволяет узнать усилия тяжения в проводах и тросах, перемещения точек подвеса и величину возможного продёргивания проводов и тросов в зажимах или даже их обрыв. Программа является перспективным инструментом для анализа поведения системы при аварийных ситуациях и может быть использована при выполнении расчётов на прогрессирующее обрушение.

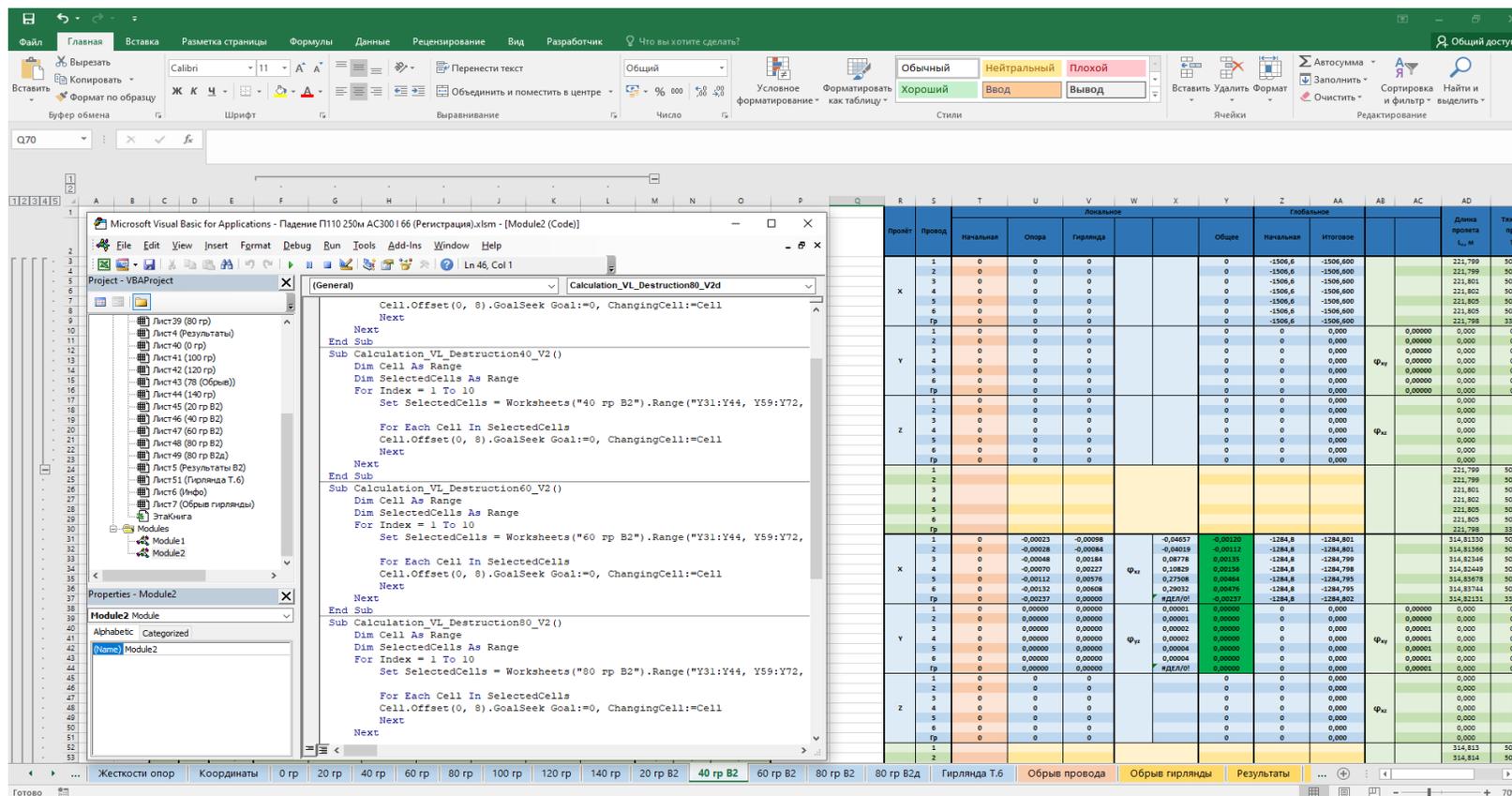


Рисунок 7.1 – Общий вид таблиц с расчётами и скриптами в разработке

8. Выводы и предложения

1.1 Обрыв провода на участке линии приводит к изменению усилия тяжения как в оборванном проводе, так и в других проводах и тросах. Статический расчёт показывает, что наибольшее изменение усилия в большую сторону для рассматриваемого участка линии ВЛ 330 кВ происходит в грозотросе при обрыве наиболее близкого к нему провода и составляет 2,57% при гололёдном режиме.

1.2 Обрыв провода в пролете приводит к уменьшению его собственного усилия тяжения в ближайших и последующих за ними пролетах с постепенным его выравниванием до начальных значений. В некоторых случаях для рассматриваемой модели усилие уменьшается лишь до 89,4%, что приводит к большой горизонтальной нагрузке на промежуточную опору в месте обрыва.

1.3 Для сочетания условий при гололеде без ветра эффект поддержки промежуточной опоры каждым из необорванных проводов и тросов составляет не более 5% от их первоначального усилия, что говорит об отсутствии необходимости такого расчёта при данных условиях.

2.1 В обоих случаях выхода из строя опоры в линейной системе ВЛ ключевым фактором для обрыва проводов и тросов является комбинация длины пролёта и место расположения условного шарнира по высоте опоры. Для каждого рассматриваемого участка существует такая длина пролёта, при значении больше которой обрыв провода или грозотроса не происходит при любом положении условного шарнира. В таких случаях тяжение на соседнюю промежуточную опору становится односторонним без поддерживающего эффекта другими проводами или тросами, что может привести к её обрушению.

3.1 Рассмотренный пример падения промежуточной опоры П110-6 показывает, что даже применение зажимов ограниченной прочности заделки не позволяет обеспечить несущую способность соседней промежуточной опоры и приводит к её обрушению. Вариантом защиты от такого обрушения должны быть проектные решения (конструкция опоры, конструкция зажима, выбор длины пролёта) и выполненный соответствующий расчёт, которые помогут избежать появления таких чрезмерных усилий на соседние опоры и не допустит прогрессирующее обрушение нескольких опор на участке линии.

Доклад закончен!

Благодарю за внимание!