

**П.А. Кузнецов**

**С.В. Аверьянов**

**Г.Г. Угаров**

*Саратовский государственный технический университет*

**В.Я. Башкевич**

*Нижне-Волжское ПМЭС филиал ОАО «ФСК ЕЭС»*

## **АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ПЛЯСКИ ПРОВОДОВ И ГРОЗОТРОСОВ НА КОНСТРУКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ПРОЛЕТОВ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ 110, 500 кВ**

Используемые в настоящее время методики механического расчета элементов промежуточного пролета воздушной линии электропередачи (ВЛ) не учитывают пляску проводов и грозотросов, что влечет за собой снижение устойчивости линий при эксплуатации в условиях динамического воздействия на них пляски. Кроме того, ни одна из систем мониторинга ВЛ не обнаруживает появление пляски проводов и не измеряет ее параметры.

Используя подходы к модели механического воздействия гололедно-ветровых нагрузок на элементы ВЛ, изложенные в [1], проведем качественный анализ возможных результатов динамического воздействия пляски проводов и грозотросов на траверсы и тело опоры наиболее распространенных типовых конструкций ВЛ-110, 500 кВ. Под результатом динамического воздействия будем понимать определение для конкретного мгновенного распределения сил (моментов сил) продольных тяжений проводов и грозотросов на конструктивных элементах опор и определение соответствующих реакций этих элементов с целью выделения среди них элементов, испытывающих максимальные нагрузки, и поэтому с наибольшей вероятностью подвергающихся разрушениям.

Для выявления основных закономерностей сделаем упрощающие допущения, позволяющие исключить влияние факторов, затрудняющих выделение влияния вида распределения сил воздействия на его результат. А именно, при построении векторных диаграмм распределения сил на траверсах, тросостойке и теле опоры будем считать, что величины динамических составляющих всех возможных сил  $F_i$  и  $F_j$  воздействий соответственно  $i$ -ого фазного провода и  $j$ -го грозотроса равны между собой и равны некоторой нормированной единице  $F_i = F_j = 1$ . Каждая сила  $F_i$  и  $F_j$  является мгновенным значением разности 2-х противоположно направленных сил, действующих через подвеску на траверсу (тросостойку) от левого и правого полу-пролетов провода (грозотроса) линии по направлению оси визирования ВЛ.

Общеизвестно [2], что в промежуточном пролете ВЛ пляске могут быть подвержены все фазные провода и грозотросы, и т.к. колебания каждого провода (троса) не зависят от состояния остальных, то число возможных вариантов  $N$  динамических воздействий гололедно-ветровых нагрузок на траверсы, тросостойки и каждую опору при количестве проводов и тросов равном  $n$  определяется по формуле:

$$N = 2^n - 1 \quad (1)$$

Для одноцепной ВЛ-110кВ, выполненной на типовых железобетонных одностоечных опорах ПБ110-5, как представлено на рис.1(а),  $n=4$ , следовательно, количество таких вариантов равно 15. Все 15 возможных вариантов сочетаний одновременных динамических воздействий, а также соответствующие каждому варианту суммарные длины плеч  $\Sigma L$  траверс и тросостойки, на которые действуют силы  $F_i$  и  $F_j$ , представлены в таблице 1. В таблице 1 символом «+» обозначено наличие воздействия динамической силы, а символом «-» - отсутствие воздействия динамической силы конкретного провода или троса на траверсу или тросостойку.

Таблица 1. Варианты распределений динамических воздействий на элементы промежуточного пролета одноцепной ВЛ-110 кВ

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
грозотрос	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+
1-й провод	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+
2-й провод	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+
3-й провод	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+
$\Sigma L$ , дм	35	20	55	20	55	40	75	4	39	24	59	24	59	44	79

Значения  $\Sigma L$  эквивалентны суммарным величинам моментов динамических сил, рассчитанных по масштабной модели верхней части опоры как произведение:

$$\sum_{i=1}^n L = F_i \times l_i \quad (2)$$

где  $F_i = 1$  – сила  $i$ -го воздействия равная одной условной единице;  $l_i$  – длина плеча  $i$ -го воздействия, в дециметрах.

Анализ величин  $\Sigma L$  для всех 15 вариантов, показывает, что наибольшее силовое воздействие на тело опоры будет иметь место при суммарной длине плеч воздействия динамических сил равной 79 дм соответствующей варианту 15, у которого одновременно пляшут 3 провода и грозотрос, и, соответственно,

динамические силы приложены по всем трем проводам и грозотросу. Однако, учитывая то, что условия образования отложений на фазных проводах и грозотросе различны, да и жесткость грозотроса и монтажные тяжения в нем отличаются от жесткости и монтажных тяжений в фазных проводах, можно с высокой достоверностью утверждать, что случаи одновременной пляски всех трех проводов и грозотроса маловероятны. Несколько меньшим силовым моментным потенциалом обладает вариант 7, и еще меньшими 13 и 11, 5 и 3. Варианты 11 и 13 маловероятны из-за присутствия в них силового воздействия грозотроса, как и вариант 15, и поэтому они далее рассматриваться не будут. Для варианта 7, у которого  $\Sigma L = 75$  дм, характерны одновременная пляска только 3-х фазных проводов и, соответственно, наличие одновременных динамических воздействий равных сил  $F_1$ ,  $F_2$  и  $F_3$ . Из [2] известно, что вероятность одновременной пляски 3-х проводов одноцепной ВЛ или примерно равна вероятностям пляски двух любых проводов, или меньше их в 1,5-2 раза, но пляска 3-х проводов имеет больший суммарный момент сил, чем пляска 2-х проводов (варианты 5 и 3), поэтому подробно рассмотрим вариант 7–одновременная пляска 3-х проводов.

При одновременном колебании 3-х проводов за счет изменения направления действия сил  $F_1$ ,  $F_2$  и  $F_3$  из двух возможных направлений вправо или влево от опоры вдоль линии принципиально возможно  $\hat{E}$  возможных комбинаций направления сил. Количество таких комбинаций в общем виде определяется следующим выражением:

$$K = 2^{n-1} \quad (3)$$

Для 3-х проводов  $n-1=3$  и, следовательно,  $K=8$ . Все восемь возможных вариантов распределения сил и соответствующие им реакции обоих траверс и тела опоры (вид сверху), совмещенные с масштабным изображением верхней части опоры, представлены на рис.1(б-и). Штриховой линией показана реакция (прогиб), соответствующей траверсы относительно своего первоначального положения под действием соответствующего вектора нагрузки. Отклонения тел опор  $\Delta\beta$  по оси визирования ВЛ на рис.1 обозначены штриховыми линиями, величина каждой из которых пропорциональна суммарному моменту воздействующих сил  $F_1, F_2, F_3$ . Величина и направление вращательного движения тела опоры вокруг своей оси под действием этих же сил отражены на рис.1 соответствующими по направлению и длине круговыми векторами  $F_4 \div F_{11}$ .

Анализ изображенного на рис.1(б-и) показывает, что вариант "б" является зеркальным отображением варианта "и", вариант "в" соответственно – отображением варианта "з", вариант "г" соответственно - отображением варианта "ж", вариант "д" соответственно – отображением варианта "е", т.е.

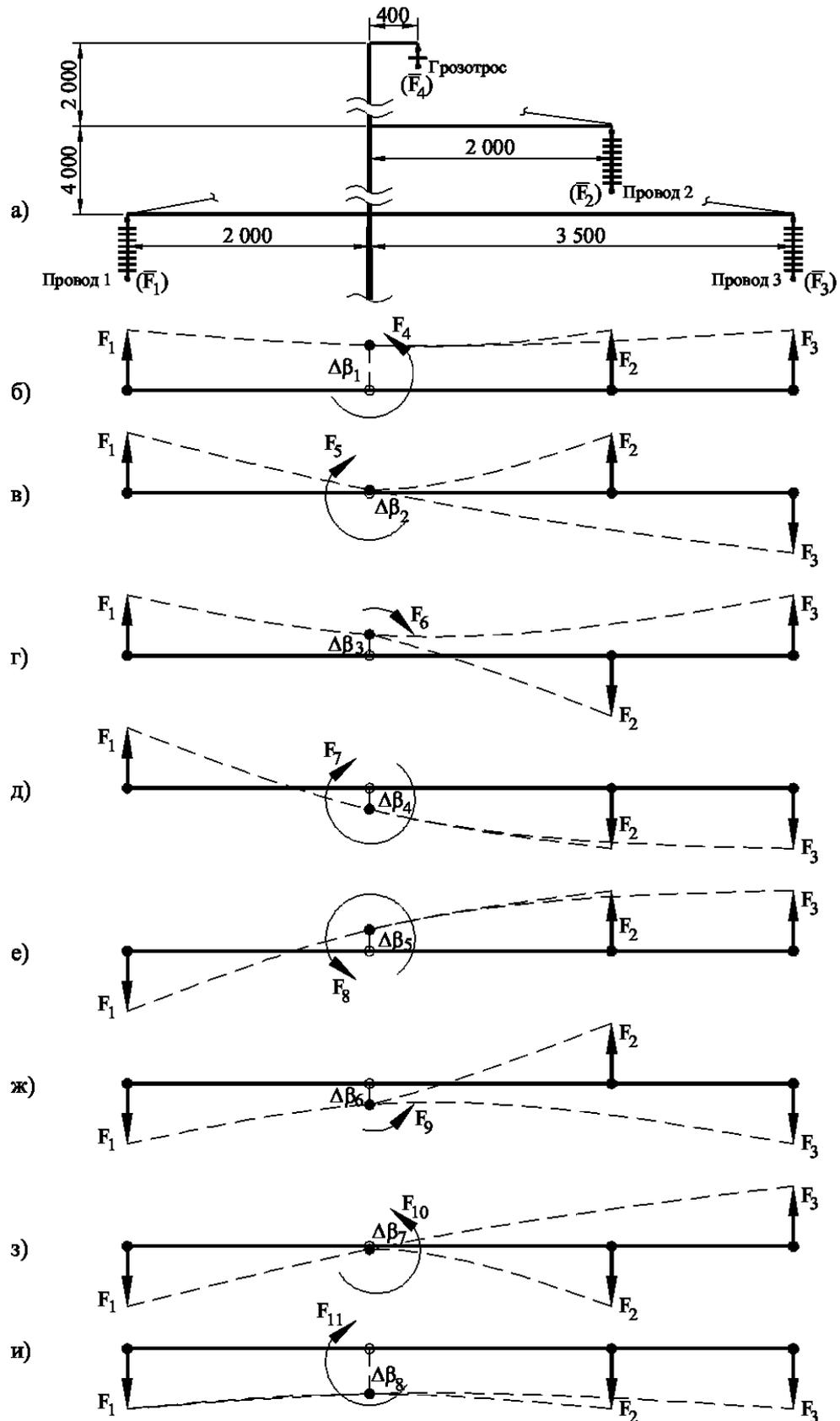


Рис.1. Результаты динамического воздействия на опору типа ПБ110-5 одноцепной ВЛ-110 кВ: а) масштабное изображение верхней части опоры ВЛ; б-и) варианты распределения сил и соответствующие реакции элементов опоры

распределение воздействий и соответствующих им реакций элементов промежуточного пролета имеют зеркальную симметрию в плоскости перпендикулярной оси визирования линии. В вариантах распределения сил "б", "в", "д", "е", "з" и "и" присутствуют большие моменты вращения опоры вокруг своей оси с одновременными наклонами ее по оси визирования линии. Как показали результаты анализа гололедно-ветровых аварий такие одновременные воздействия значительных моментов вращения и наклонов для железобетонных центрифугированных опор являются наиболее аварийно опасными. Из 6-ти следующих вариантов распределения сил "б", "в", "д", "е", "з", "и" в вариантах "б" и "и" имеют место самые большие продольные наклоны опор, а в вариантах "д" и "е" - самые большие вращательные моменты опор по сравнению с остальными. Следовательно, при вариантах "б" и "и", "д" и "е" распределения сил, вызванных пляской проводов, наиболее вероятны поломки опор и траверс.

По аналогии с анализом для одноцепной ВЛ-110 кВ, соблюдая принятые в нем упрощения и условные обозначения, проведем анализ механических воздействий пляски проводов и грозотросов, возникающих при гололедно-ветровых нагрузках на элементы промежуточного пролета двухцепной ВЛ-110 кВ с железобетонными опорами типа ПБ110-8.

Для двухцепной линии число  $n$  – общее количество проводов и тросов – равно 7. Считая маловероятными события одновременной пляски шести проводов и грозотроса, исключаем грозотрос из расчета при определении числа возможных вариантов  $N$  динамических воздействий пляски на три траверсы, тросостойку и тело опоры. Тогда в соответствии с выражением (1) число  $N$  при  $n = 6$  будет равно  $N = 2^6 - 1 = 63$ .

Все 63 возможных варианта одновременных динамических воздействий, а также соответствующие каждому варианту суммарные длины плеч  $\Sigma L$  траверс, на которые действуют силы  $F_1 \div F_6$ , представлены в таблице 2, состоящей из основной таблицы, содержащей варианты с 1 по 21, и ее двух продолжений, включающих варианты с 22 по 42 и с 43 по 63.

Анализ всех возможных вариантов показывает, что наибольшее силовое воздействие на тело опоры будут оказывать силы, действующие при суммарной длине плеч, соответствующей варианту 63, в котором динамические силы  $F_1 \div F_6$  приложены одновременно по всем шести проводам.

Для выбора из всех возможных наиболее вероятных вариантов рассмотрим явления возникновения, развития и устойчивых колебаний проводов в промежуточном пролете двухцепной ВЛ-110 кВ с учетом взаимного механического взаимодействия проводов, находящихся на одной и той же траверсе. Два провода, закрепленных на противоположных концах одной и той же траверсы при устойчивых колебаниях вызывают синфазное возбуждение друг друга, т.е. при прочих равных условиях можно считать, что симметричные провода, закрепленные на траверсе каждого уровня, будут наиболее вероятно колебаться попарно. Это явление объясняется тем, что часть механической

энергии колебаний через траверсу передается на симметричный провод, благодаря чему для этого провода облегчаются условия возникновения и поддержания режима устойчивых колебаний, т.к. практически всегда выполняются условия взаимного синхронизма.

Таблица 2. Варианты распределений динамических воздействий на элементы промежуточного пролета двухцепной ВЛ-110 кВ

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1-й провод	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2-й провод	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+
3-й провод	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-
4-й провод	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+
5-й провод	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-
6-й провод	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+
$\Sigma L$ , дм	20	35	55	20	40	55	75	20	40	55	75	40	60	75	95	35	55	70	90	55	75

Продолжение таблицы 2

№ варианта	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
1-й провод	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
2-й провод	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3-й провод	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+
4-й провод	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-
5-й провод	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+
6-й провод	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-
$\Sigma L$ , дм	90	110	55	75	90	110	75	95	110	130	20	40	55	75	40	60	75	95	40	60	75

Продолжение таблицы 2

№ варианта	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63
1-й провод	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
2-й провод	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
3-й провод	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+
4-й провод	-	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+
5-й провод	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+
6-й провод	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+
$\Sigma L$ , дм	95	60	80	95	115	55	75	90	110	75	95	110	130	75	95	110	130	95	115	130	150

Развитие устойчивых колебаний пляски пары проводов, как правило, происходит следующим образом – сначала возникают динамические колебания на одном проводе, далее динамические воздействия распространяются на симметричный диаметрально противоположный провод через общую траверсу, что способствует возникновению синхронного колебания обоих проводов и

далее до устойчивых колебаний на них. Эти устойчивые колебания симметричных пар синхронные и резонансные. При наличии условий возникновения и поддержания колебаний проводов ВЛ ввиду равенства геометрических и весовых характеристик проводов и траверс верхнего и нижнего ярусов возникновение пляски на этих ярусах более вероятно, чем на верхнем и среднем, среднем и нижнем, и тем более всех трех ярусах.

Таким образом, исключая из рассмотрения вариант 63 как маловероятный, рассмотрим наиболее вероятный вариант 45, в котором наблюдается одновременная пляска двух пар проводов верхнего и нижнего ярусов, а также менее вероятные по сравнению с вариантом 45 варианты с пляской проводов верхнего и среднего ярусов (вариант 54), и среднего и нижнего ярусов (вариант 27). Следует заметить, что вариант 45 уступает двум другим, так как в нем имеет место меньшее суммарное плечо воздействия на тело опоры ( $\Sigma L=80$  дм), чем в вариантах 54 и 27, для которых имеет место равенство суммарных динамических воздействий ввиду равенства суммарных плеч ( $\Sigma L=110$  дм) этих воздействий. При сравнении вариантов 54 и 27 выясняется, что величина суммарной длины плеч динамических воздействий на тело опоры относительно ее фундамента для варианта 54 будет больше величины суммарной длины плеч для варианта 27. Поэтому наиболее целесообразно подробно рассматривать вариант 54 одновременных колебаний двух пар проводов среднего и верхнего ярусов.

При одновременном колебании двух пар проводов верхней и средней траверс за счет изменения направления действия сил  $F_1, F_4$  и  $F_2, F_5$  из двух возможных направлений вправо или влево от опоры вдоль линии принципиально возможно  $\dot{I}$  вариантов распределений направлений действия динамических сил и соответствующих им реакций. Число  $\dot{I}$  определяется в соответствии с выражением:

$$M = 2^{n-3} \quad (4)$$

В выражении (4) из общего числа проводов и грозотросов  $n=7$  вычитаются исключенные из рассмотрения два провода нижнего яруса и грозотрос ( $n-3$ ). Таким образом, число  $K = 2^{7-3} = 2^4 = 16$ .

Так же, как и для рассмотренной выше одноцепной ВЛ, при анализе динамических воздействий на промежуточную опору рассматриваемой линии наблюдается зеркальная симметрия всех (в данном случае 16) возможных вариантов распределений: с 1 по 8 вариантам соответствуют их зеркальные аналоги – варианты 9 по 16. Распределения с 1 по 8 и соответствующие им реакции обоих траверс и тела опоры, совмещенные с масштабным изображением верхней части опоры типа ПБ110-8 двухцепной ВЛ-110 кВ, представлены на рис.2.

Анализ изображенного на рис.2(б-и) показывает, что в вариантах "в", "г",

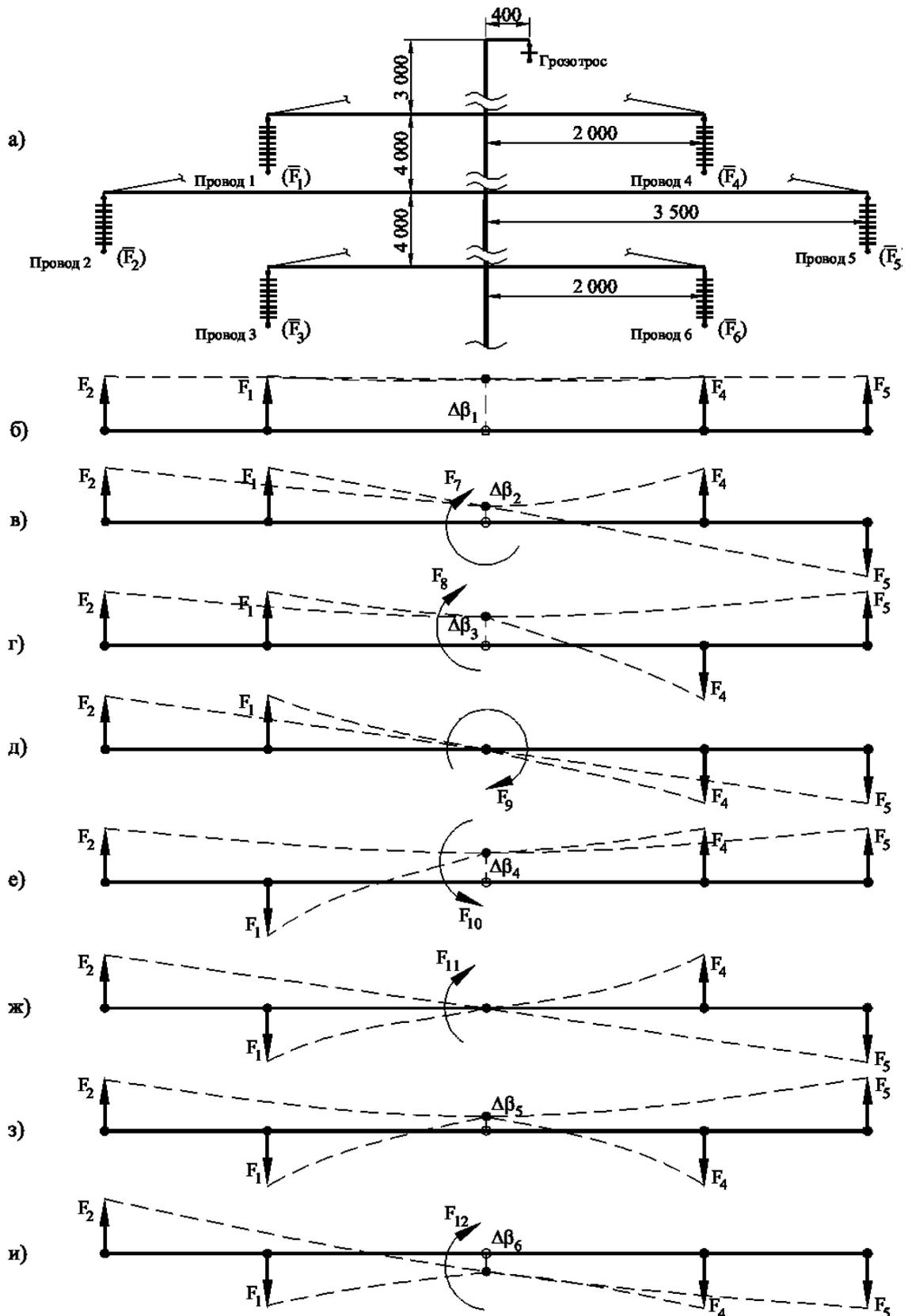


Рис.2. Результаты динамического воздействия на опору типа ПБ110-8 двухцепной ВЛ-110 кВ: а) масштабное изображение верхней части опоры ВЛ; б-и) варианты распределения сил и соответствующие реакции элементов опоры

"е", "и" и их зеркальных аналогах имеют место наиболее аварийно опасные случаи одновременных наклона опоры вдоль оси визирования линии и вращения опоры вокруг своей оси. В вариантах "б" и "д" и их зеркальных аналогах соответственно имеют место максимальные наклоны и вращения опоры вокруг своей оси. Следовательно, при таких распределениях сил поломки опор и траверс будут наиболее вероятны. Варианты "ж" и "з" и их зеркальные аналоги характеризуются распределениями сил, при которых механическое воздействие на траверсы и тело опоры ВЛ в сравнении с остальными вариантами меньше. Анализ динамических воздействий пляски проводов на траверсу и тело железобетонной двухстоечной опоры типа ПБ-2 ВЛ-500 кВ произведем делая аналогичные упрощения, как и при анализе для промежуточных пролетов ВЛ-110 кВ.

Следует отметить, что ВЛ-500 кВ характеризуется наличием в каждой из трех расщепленных фаз трех проводов, и поэтому соотношение веса проводов в расщепленной фазе и грозотроса для такой линии значительно больше, чем для ВЛ-110 кВ; существенно отличается и аэродинамика трех проводов в фазе в сравнении с аэродинамикой грозотроса. Это в значительной степени снижает вероятность одновременной пляски фаз проводов и грозотросов в сравнении с вероятностью такого события для ВЛ-110 кВ.

Для ВЛ-500 кВ общее количество проводов и тросов – число  $n$  – равно 5. Принимая варианты одновременной пляски фаз проводов и грозотросов как маловероятные, и, исключая поэтому из рассмотрения оба грозотроса, определим число возможных вариантов  $N$  динамических воздействий на траверсу и две стойки опоры по следующему выражению:

$$N = 2^{n-2} - 1 \quad (5)$$

Таким образом, число  $N$  равно 7.

Все 7 возможных вариантов одновременных динамических воздействий сил  $F_1 \div F_3$  на траверсу и стойки опоры и соответствующие каждому варианту суммарные длины плеч ( $\Sigma L$ ) этих воздействий представлены в таблице 3.

Таблица 3. Варианты распределений динамических воздействий на элементы промежуточного пролета ВЛ-500 кВ

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7
Фаза А	–	–	–	+	+	+	+
Фаза В	–	+	+	–	–	+	+
Фаза С	+	–	+	–	+	–	+
$\Sigma L$ , дм	60	60	120	60	120	120	180

Анализ представленных в таблице 3 вариантов показывает, что наибольшее силовое динамическое воздействие на траверсу и стойки опоры

типа ПБ-2 ВЛ-500 кВ будет наблюдаться при суммарной длине плеч воздействия, соответствующей варианту 7. Поэтому более подробно рассмотрим вариант 7, в котором при одновременной пляске всех трех расщепленных фаз проводов за счет изменения направления действия динамических сил  $F_1$ ,  $F_2$  и  $F_3$  вправо или влево от опоры ВЛ принципиально возможно  $K$  вариантов распределений направлений действия динамических сил и соответствующих им реакций. Число  $K$  определяется в данном случае по выражению:

$$K = 2^{n-2}. \quad (6)$$

В выражении (6) из общего числа проводов и грозотросов  $n$  вычитаются исключенные из рассмотрения два грозотроса. Таким образом, число  $K = 8$ . Масштабное изображение верхней части двухстоечной опоры ПБ-2 и все 8 возможных вариантов распределений сил динамических воздействий с соответствующими реакциями элементов опоры представлены на рис.3.

Анализ изображенного на рис.3(б-и) показывает, что в вариантах "б" и "и" имеют место максимально возможные при принятых условиях наклоны опоры вдоль оси визирования ВЛ. В вариантах "в", "д", "е" и "з" имеют место случаи одновременных наклонов опоры и моментов вращения одной из стоек опоры относительно вертикальных осей, проходящих через точки присоединения траверсы к стойке опоры. В вариантах "г" и "ж" наряду с наклоном опоры имеют место наибольшие вращательные моменты, под воздействием которых вращаются обе стойки опоры и значительно прогибается траверса. Таким образом, в вариантах "б", "и", "г" и "ж" распределения сил динамического воздействия опоры ВЛ-500 кВ воспринимает при прочих равных условиях максимальные нагрузки, величина которых может превышать величины механической прочности траверсы и стоек опоры.

Явлению пляски свойственно многообразие сочетаний и характеров динамических воздействий на элементы промежуточных опор ВЛ. Представленный метод анализа динамических воздействий гололедно-ветровых нагрузок на элементы промежуточных опор ВЛ-110, 500 кВ, несмотря на его качественный подход, позволяет получить достоверное распределение сил и соответствующих реакций траверс и тела опоры для ВЛ любых конструкций и любых рабочих напряжений. Установлено, что главной причиной поломок траверс и опор промежуточных пролетов ВЛ любых типов является суммарное силовое динамическое воздействие нескольких (например, 2-х или 3-х для одноцепной линии) пляшущих фазных проводов, возникающее при совпадении случайных синфазных колебаний фазных проводов в смежных промежуточных пролетах. При этом величина случайной суммарной динамической силы обратно пропорциональна вероятности её возникновения, в связи с чем, анализ динамических воздействий гололедно-ветровых нагрузок на

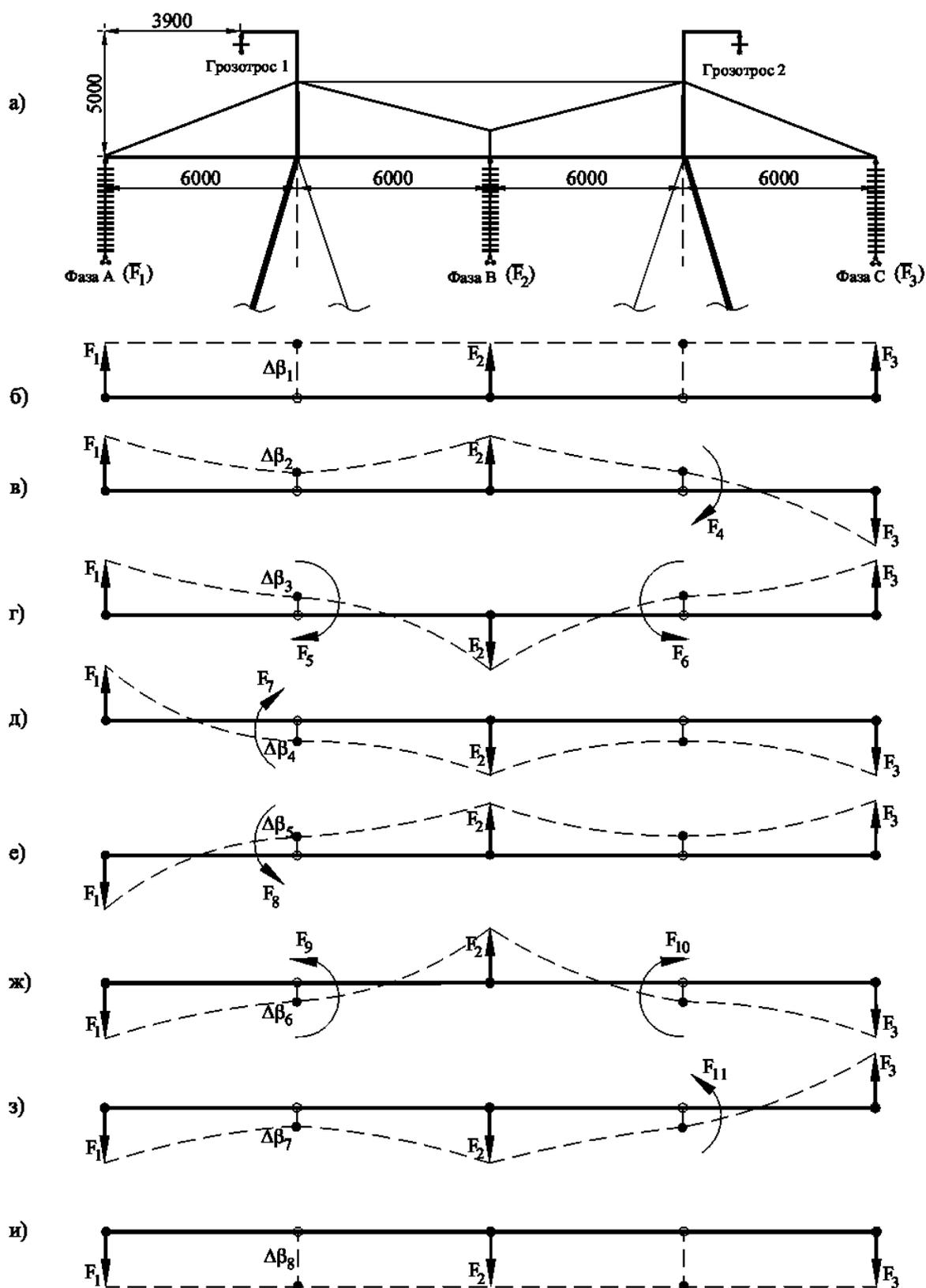


Рис.3. Результаты динамического воздействия на опору типа ПБ-2 ВЛ-500 кВ:  
 а) масштабное изображение верхней части опоры ВЛ;  
 б-и) варианты распределения сил и соответствующие реакции элементов опоры

элементы промежуточных опор ВЛ основывается на рассмотрении срединных – наиболее аварийно-опасных и при этом высоковероятных – вариантов динамических воздействий.

По результатам анализа вектора суммарных сил динамических воздействий, вызывающих наклоны тела опоры, направлены вдоль оси визирования ВЛ. Суммарные динамические силы при этом имеют равные высоте размещения траверс (тросостоек) над землей плечи воздействий по отношению к фундаменту опоры. Ввиду значительной длины плеч приложения суммарных сил динамических воздействий механическая прочность конструкций траверс и тела опоры в этом направлении значительно ниже механической прочности, определяющей реакции элементов и тела опоры направленным вертикально вниз статическим нагрузкам. Кроме того, под воздействием суммарных сил динамических воздействий вместе с наклоном опор имеет место наличие момента вращения тела опоры вокруг своей оси, что приводит к возникновению дополнительных напряжений в теле опоры и росту разрушающего воздействия на него.

Таким образом, особенности воздействия сил, возникающих при пляске проводов и грозотросов в промежуточном пролете, заключаются в том, что они практически всегда перпендикулярны тросостойкам, траверсам и телу опоры и приложены на максимально возможные плечи воздействий на них, в отличие от сил нагрузок веса проводов, грозотроса, изоляторов, крепежной арматуры и отложений на проводах (грозотросах), приложенных в направлении максимальной прочности элементов конструкции опоры при минимально возможных плечах воздействий.

Если учесть, что значение момента суммарной нагрузки на элементы опоры во время пляски проводов может превышать исходную статическую гололедно-ветровую нагрузку в 2-3 и более раз [2], то из всего вышеописанного следует, что динамические воздействия пляски проводов (грозотросов) в сравнении со всеми остальными нагрузками на элементы ВЛ являются наиболее аварийно опасными, и, следовательно, требуют первоочередного учета при создании систем мониторинга состояния ВЛ.

Обобщая изложенное в статье, можно отметить, что:

- во-первых: главной причиной поломок траверс и опор промежуточных пролетов ВЛ любых типов является воздействие на них суммарных силовых динамических моментов нескольких пляшущих фазных проводов при совпадении случайных синфазных колебаний фазных проводов в смежных промежуточных пролетах;

- во-вторых: в сравнении со статическими нагрузками, плечи воздействий которых практически равны нулю, воздействия суммарных динамических сил пляски проводов и грозотросов практически всегда приложены на максимально возможные плечи воздействий в направлении меньшей механической прочности элементов конструкции линии, что существенно повышает вероятность возникновения аварии;

- в-третьих: под воздействием суммарных сил динамических воздействий вместе с наклоном опор одновременно происходит вращение тела опоры вокруг своей оси, что приводит к возникновению дополнительных напряжений в теле опоры и росту разрушающего воздействия на нее;

Таким образом, одной из главных задач мониторинга гололедно-ветровых нагрузок на элементы ВЛЭП является обнаружение момента возникновения пляски проводов, возникающего при достижении суммарным моментом сил динамического воздействия порогового значения, и, как результат, выдача команды на плавку отложений. При этом задачи обнаружения пляски и измерения ее параметров можно решать:

а) путем непрерывного измерения текущего распределения воздействующих сил пляски, суммирования их, и сравнения с порогом, определяемым в режиме отсутствия пляски и наличия статической нагрузки;

б) путем измерения либо скорости прогиба траверс, либо скорости изменения наклона опоры и последующего сравнения измеренной величины с пороговым значением, характеризующим режим отсутствия пляски и наличия статической нагрузки.

Кроме того, в связи с тем, что явлению пляски предшествует появление условий ее возникновения (гололедные отложения и ветер), одним из вариантов технической реализации системы мониторинга гололедно-ветровых нагрузок на ВЛ является создание телеметрической информационно-измерительной системы, способной автоматически, в реальном масштабе времени обнаруживать появление условий возникновения пляски проводов (грозотросов), включающую в себя систему распознавания формы отложений.

## Литература

1. К построению модели механического воздействия гололедно-ветровых нагрузок на элементы промежуточного пролета воздушной линии электропередачи / С.В. Аверьянов, Г.Г. Угаров, В.Я. Башкевич и др. // Электронный журнал "Новое в российской электроэнергетике". – 2004. - №11. - С.29-36.

2. Байрамгулов Ю.Ж. Совершенствование сельских воздушных линий 6 – 10 кВ, подверженных динамическим нагрузкам: Дис. докт. техн. наук: 05.20.02 / Башкир. ордена труд. крас. знам. ун-т. – СПб., 1993. – 281с.