

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ СЪЕМКИ, ПРОЕКТИРОВАНИЯ, СТРОИТЕЛЬСТВА И МОНТАЖА ВЛ—110—400 кв

Топографо-геодезические изыскания, проектирование, строительство и монтаж проводов воздушных высоковольтных линий электропередач (ВЛ) неизбежно сопровождаются ошибками. Совокупность действия этих ошибок может привести к нежелательному нарушению габаритов проводов на трассе ВЛ, особенно в случае ее переходов. Поэтому при проектировании необходимо изменять установленный габарит на некоторую величину. Однако рекомендаций и обоснования для ее выбора соответствующие инструкции не дают.

В [3—6] нами теоретически исследованы погрешности съемки и проектирования переходов ВЛ, рассмотрены причины их возникновения и получена формула суммарной ошибки  $m_{h_2}$  для наиболее общего случая

$$m_{h_2}^2 = m_n^2 + m_{h_p}^2 + K_e m_l^2 + K_{l_x} m_{e_x}^2 + m_{h_t}^2 + m_{h_v}^2 + m_{h_f}^2. \quad (1)$$

В формулу (1) вошли средние квадратические ошибки за неточное определение отметок места установки опоры на профиле  $m_n$  и точки пересечения на проводе  $m_{h_p}$ , за погрешности измерений длины  $l$  пролета  $m_l$  и расстояния  $l_x$  от точки пересечения до опоры с большей высотой подвески провода  $m_{l_x}$ , за неточное определение температуры провода  $m_{h_t}$  за неточный учет влияния ветра  $m_{h_v}$  и гололеда  $m_{h_f}$  на провод в момент съемки. Коэффициенты  $K_l$  и  $K_{l_x}$  объединяют ряд характеристик.

Формула (1) без трех последних членов может быть использована для любого пролета ВЛ.

Для ошибок и коэффициентов, входящих в выражение (1), в [4] и [5] выведены формулы, но из-за их сложности они здесь не приводятся. В [6] представлена таблица предельных значений  $M = 2m_{h_2}$ , которые рекомендуется учитывать в габаритах переходов при проектировании. Величины  $M$  выбираются из таблицы по ряду аргументов и лежат в пределах  $\pm 0,5—0,7$  м. Однако при неблагоприятных условиях (при очень длинных пролетах и низкой точности линейных измерений, 1:300) допуск  $M$  может превосходить этот предел.

Погрешности, возникающие в процессе строительства и монтажа проводов ВЛ, целесообразнее исследовать эмпирическим путем. С этой целью, и для подтверждения формулы (1), в 1970—1972 гг. нами была выполнена съемка 27-ми больших переходов ВЛ — 110—400 кв в шести западных областях Украины. Полевые работы проводились по специально разработанной программе так, чтобы средняя квадратическая ошибка определения габарита или стрелы провеса провода была на порядок меньше величины  $M$ , то есть равна  $\pm 5—6$  см.

Съемка переходов производилась 30'' теодолитом с двух станций при двух высотах инструмента. Все линии измерялись стальной лентой в прямом и обратном направлениях и дальномером. На каждом переходе на высоте 1,5—2 м над землей измерялись температура воздуха, скорость и направление ветра.

В результате обработки полевых измерений получены необходимые отметки точек перехода, а по ним и фактические габариты  $h_2^{\phi}$  и стрелы провеса провода  $f_x^{\phi}$  в месте пересечения.

Скорость ветра  $v_h$  на средней высоте пролета определялась по известной логарифмической формуле С. А. Сапожниковой [2] для приземного слоя воздуха. На некоторых переходах  $v_h$  оказалась значительной и пришлось ввести поправки на ветер  $\Delta H_{P_v}$  в габариты и в стрелы провеса по формулам:

$$h_z = h_z^\phi - \Delta H_{P_v}, \quad f_x = f_x^\phi + \Delta H_{P_v}, \quad (2)$$

где [5]

$$\Delta H_{P_v} = (f_x^\phi \cos \varphi) - f_x^\phi - \Delta f, \quad (3)$$

а  $\varphi$  и  $\Delta f$  — угол отклонения провода от плоскости пролета и приращение стрелы провеса провода под действием ветра. Приращение  $\Delta f$  определяется из квадратного уравнения [5]

$$A\Delta f^2 - B\Delta f + C = 0. \quad (4)$$

В уравнении (4)  $A$ ,  $B$  и  $C$  — коэффициенты, зависящие от  $l$ ,  $l_x$ ,  $\varphi$ ,  $f_x$  и других параметров.

Поправки  $\Delta H_{P_v}$  оказались невелики, а ошибки их определения  $m_{H_v}$  по формуле из [5] пренебрежимо малы ( $m_{H_v} \leq 1$  см).

Погрешность  $m_{h_t}$  за влияние ошибки определения температуры провода во время съемки  $m_t$  подсчитаем по формуле [4]:

$$m_{h_t} = \frac{2E\alpha m_t}{\{ql_x(l-l_x)(1:f_x^2) + 2,72E f_x(1:l_x(l-l_x))\}}, \quad (5)$$

где  $E$  — модуль упругости,  $\alpha$  — температурный коэффициент,  $q$  — удельная нагрузка на провод от его веса.

Величину  $m_t$  найдем по формуле

$$m_t^2 = m_{t_1}^2 + m_{t_2}^2 + m_{t_3}^2 + m_{t_4}^2, \quad (6)$$

где  $m_{t_1}$  — ошибка отсчета по термометру,  $m_{t_2}$  — ошибка за неточность градиента температуры,  $m_{t_3}$  — ошибка за отличие температуры воздуха от температуры провода,  $m_{t_4}$  — ошибка за неравномерность температуры провода, вызываемую стрелой провеса.

Приняв реальные числовые значения этих ошибок, получим

$$m_t^2 = (0,3^\circ)^2 + (0,5^\circ)^2 + (1,0^\circ)^2 + (0,5^\circ)^2 = 1,54^\circ,$$

$$m_t = \pm 1,24^\circ.$$

С учетом  $m_t$  погрешность  $m_{h_t}$  для самого крупного перехода № 21 (см. таблицу) длиной в 460 м равна  $\pm 0,05$  м. Для других переходов расчеты дали  $m_{h_t} = \pm 3-4$  см.

Погрешность в превышениях точек перехода определим по формуле [4]

$$m_h^2 = \text{tg}^2 \beta (m_{D_1}^2 + m_{D_2}^2) + \frac{m_\beta^2 D^2}{\rho^2 \cos^4 \beta}, \quad (7)$$

где  $\beta$  — угол наклона,  $m_{D_1}$  — ошибка проектирования точки провода на землю,  $m_{D_2}$  — ошибка измерения расстояния  $D$  от инструмента до точки проекции.

Для наиболее неблагоприятного случая при наибольших значениях  $D=200$  м,  $m_\beta = \pm 0,25'$ ,  $m_{D_1} = \pm 10$  см (при снесении точек на землю теодолитом),  $m_{D_2} = \pm 10$  см (1:T=1:2000),  $\beta=10^\circ$  для точек на проводе и  $\beta=5^\circ$  для точек на земле результаты вычислений по формуле (6) таковы:

а) для точек на проводе  $m_h = \pm 2,9$  см,

в) для точек на земле  $m_{h_0} = \pm 1,7$  см.

Учитывая, что съемка нами производилась с двух станций, ошибки  $m_h$  и  $m_{h_0}$  можно уменьшить в  $\sqrt{2}$  раз. Тогда  $m_h = \pm 2$  см,  $m_{h_0} = \pm 1,2$  см.

Используя полученные ошибки, найдем погрешности определения высоты опоры  $m_{h_a}$  ( $m_{h_b}$ ), стрелы провеса провода  $m_f$  и габарита перехода  $m_{h_2}$ :

$$m_{h_a}^2 = m_{h_b}^2 = m_h^2 + m_{h_0}^2 = 2^2 + 1,2^2 = \pm 2,3 \text{ см.}$$

$$m_f^2 = 3m_h^2 + m_{h_t}^2 + m_{h_v}^2 = 3 \cdot 2^2 + 4^2 + 1^2 = \pm 5,4 \text{ см.}$$

$$m_{h_2}^2 = 3m_h^2 + m_{h_0}^2 + m_{h_t}^2 + m_{h_v}^2 = 3 \cdot 2^2 + 1,2^2 + 4^2 + 1^2 = \pm 5,5 \text{ см.}$$

Таким образом необходимая точность измерений была практически достигнута.

Найдем теперь разности  $\Delta h_2$  измеренных габаритов  $h_2$  с их теоретическими (проектными) значениями  $h_2^T$ . В проекте  $f_x^T$  и  $h_2^T$  даются для определенной температуры, которая обычно не совпадает с температурой при съемке. Для устранения этого разногласия значения  $f_x^T$  и  $h_2^T$  были вычислены вновь по известным формулам:

$$f_x^T = \frac{l_x(l-l_x)q}{2\sigma}, \quad (8)$$

$$h_2^T = H_B - (H_B - H_A) \frac{l_x}{l} - H_P - f_x^T. \quad (9)$$

В этих формулах  $\sigma$  — напряжение растяжения провода, которое выбиралось из монтажных таблиц проекта по температуре и длине пролета, либо находилось из решения уравнения состояния провода,  $H_B$ ,  $H_A$ ,  $H_P$  — отметки точек подвески провода на опорах и точки пересечения.

Разности  $\Delta h_2 = h_2 - h_2^T$  можно сравнить с допусками  $M$ , если они не будут искажены погрешностями строительства. Поэтому вычисление  $f_x^T$  и  $h_2^T$  производилось по измеренным величинам  $l$ ,  $l_x$ ,  $H_A$ ,  $H_B$  и  $H_P$ . Это позволило избежать влияния на  $\Delta h_2$  погрешностей строительства (за изменение длины пролета, за изменение высот подвески провода и за смещение пролета вдоль оси ВЛ). Кроме того, если на основе проектных данных вычислить значения  $f_x^{T'}$  и  $h_2^{T'}$ , то по разностям  $\Delta h_2' = h_2^{T'} - h_2^{T'}$  можно судить о влиянии перечисленных ошибок строительства. Стрелы провеса  $f_x$ ,  $f_x^T$ ,  $f_x^{T'}$ , габариты  $h_2$ ,  $h_2^T$ ,  $h_2^{T'}$ , разности  $\Delta h_2$ ,  $\Delta h_2'$ , допуски  $M$  и другие величины для 27 переходов ВЛ приведены в сводной таблице.

Как видно из таблицы, измеренные длины пролетов  $l$  и высоты опор  $h_a$  и  $h_b$  до точек подвеса провода отличаются от проектных  $l'$ ,  $h_a^T$  и  $h_b^T$ . Для большинства переходов расхождения невелики, но иногда они значительны. Например, для переходов № 2 и № 7  $\Delta l = l - l' = 7,42$  м и 18,07 м, для переходов № 21 и № 24  $\Delta h_a = h_a - h_a^T$  достигает +1,27 м и -0,64 м. Заметно различие между практической разностью высот точек подвеса проводов  $\Delta H$  и проектной  $\Delta H^T$ . Оно обусловлено величинами  $\Delta h_a$  и  $\Delta h_b$  и смещением пролета вдоль оси ВЛ. Суммарное действие всех этих отклонений выражается величиной  $\Delta h_e$  (см. таблицу), которая по существу и характеризует влияние ошибок строительства на габарит перехода. Судя по знакам, погрешность  $\Delta h_2$  носит случайный характер. Ее значения лежат в области от -1,33 до 0,62 м. Одна-

Сводная таблица результатов

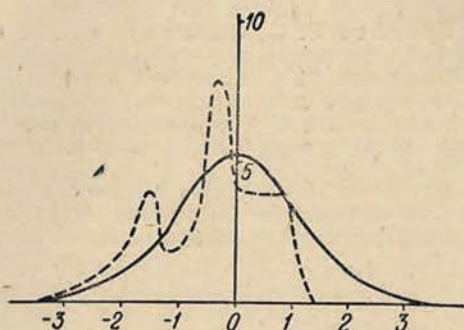
№ п.п.	На-пря-же-ние ВЛ, кВ	Марка провода	Пролеты		Высоты опор			Стрела провеса			Габариты				Разности			Вытяж-ка про-волов, $\psi$	$\Delta h_2 = \Delta h_2 + \psi$	Допуск-ки, М		
			l	l <sup>T</sup>	h <sub>a</sub>	h <sub>T</sub>	h <sub>b</sub>	h <sub>T</sub>	h <sub>b</sub>	f <sub>x</sub>	f <sub>x</sub> <sup>T</sup>	f <sub>x</sub> <sup>T</sup>	h <sub>2</sub>	h <sub>2</sub> <sup>T</sup>	h <sub>2</sub> <sup>T</sup>	h <sub>2</sub> <sup>оп.</sup>	$\Delta H$				$\Delta h_2$	$\Delta h_2^T$
1	330	АСО-300	278,83	280	21,25	21,5	14,56	15,3	6,03	7,10	7,16	11,12	10,05	10,49	8,5	9,22	8,90	-1,07	-0,44	-0,43	-1,50	±0,55
2	330	АСО-300	335,19	335	28,63	28,2	13,93	15,3	10,66	9,56	9,56	10,75	11,78	11,88	8,5	8,49	7,30	+1,03	-0,10	-0,58	+0,45	0,58
3	220	АС-400	379,92	375	22,34	22,3	22,71	22,3	11,42	10,88	10,61	7,53	7,57	7,23	8,5	3,88	2,30	+0,54	+0,34	-0,65	-0,11	0,59
4	220	АС-400	379,92	375	22,34	22,3	22,71	22,3	7,57	7,57	7,33	12,53	12,29	12,29	8,5	3,88	2,30	0	+0,34	-0,45	-0,45	0,59
5	220	АС-400	384,42	385	22,52	22,3	22,48	22,3	11,28	11,00	11,03	10,12	10,40	10,63	8,5	7,25	7,05	+0,28	-0,23	-0,66	-0,38	0,60
6	220	АС-400	299,65	301	21,84	22,3	22,52	22,3	7,14	6,70	6,77	11,05	11,49	11,58	8,0	10,60	9,67	+0,44	-0,09	-0,40	+0,04	0,56
7	220	АС-400	428,07	410	22,43	22,3	22,52	22,3	12,70	12,44	10,92	11,62	11,88	13,41	8,5	3,12	2,52	+0,26	-1,33	-0,75	-0,45	0,60
8	330	АСО-300	276,84	275	15,00	15,3	15,19	15,3	4,90	4,59	4,52	11,38	11,69	11,93	8,5	3,34	2,90	+0,31	-0,24	-0,28	+0,03	0,54
9	330	АСО-300	216,38	215	15,01	15,3	14,72	15,3	3,21	3,30	3,24	11,30	11,21	11,71	8,5	7,31	6,90	-0,09	-0,50	-0,20	-0,29	0,52
10	330	АСО-300	309,28	310	14,89	15,3	14,89	15,3	6,73	5,85	5,88	9,43	10,29	10,69	8,5	1,20	1,00	+0,88	-0,38	-0,35	+0,53	0,57
11	110	АС-185	253,59	250	13,25	13,2	12,89	13,2	4,61	4,58	4,22	9,47	9,50	9,94	7,0	3,97	3,80	+0,03	-0,44	-0,32	-0,41	0,53
12	110	АС-185	180,16	179	14,20	13,7	14,67	14,2	2,11	2,87	2,81	11,34	10,58	11,12	7,0	2,03	2,40	-0,76	+0,42	-0,20	-0,96	0,52
13	110	АС-95	189,01	188	13,75	13,7	13,27	13,2	1,93	3,18	3,15	10,39	9,14	9,11	7,0	3,18	3,60	-1,15	+0,03	-0,22	-1,37	0,56
14	110	АС-95	294,10	290	17,73	17,7	17,91	17,7	4,85	6,62	6,33	13,31	11,54	11,42	7,0	0,04	0,10	-1,77	-0,12	-0,46	-2,23	0,57
15	110	АС-95	200,69	200	13,69	13,7	13,67	13,7	3,89	4,42	4,40	10,26	9,73	9,73	7,0	0,30	0,40	-0,53	0	-0,31	-0,84	0,58
16	110	АС-185	315,14	315	17,79	17,7	18,00	17,7	9,18	9,02	9,02	8,48	8,64	8,43	7,0	1,96	1,80	+0,16	+0,21	-0,63	-0,47	0,58
17	110	АС-95	209,71	209	12,27	12,2	12,14	12,2	3,03	3,91	3,87	8,85	7,97	7,94	7,0	1,17	1,10	-0,88	+0,03	-0,27	-1,15	0,58
18	110	АС-185	234,05	235	13,18	13,2	13,35	13,2	5,54	5,07	5,12	7,30	7,77	7,73	7,0	1,32	0,80	+0,47	+0,05	-0,35	+0,12	0,55
19	110	АС-120	229,71	230	12,33	12,2	12,33	12,2	2,87	3,26	3,27	7,42	7,03	6,94	7,0	0,44	0,40	-0,39	+0,09	-0,23	-0,62	0,55
20	110	АС-120	148,86	150	12,02	12,2	11,77	12,2	2,18	1,66	1,72	7,52	8,04	8,32	7,0	3,78	2,80	+0,52	-0,28	-0,12	+0,40	0,52
21	400	АСО-500	460,62	453	30,15	28,9	30,22	28,9	14,14	13,53	12,85	17,71	18,32	17,70	9,0	5,91	4,60	+0,61	+0,62	-0,81	-0,20	0,60
22	400	АСО-500	385,33	385	22,38	22,1	22,98	22,1	11,82	10,24	10,23	10,19	11,77	11,22	9,0	0,50	0,50	+1,58	+0,55	-0,61	+0,97	0,56
23	400	АСО-500	350,54	350	22,87	21,4	22,86	21,4	6,88	6,63	6,61	15,19	15,34	14,86	9,0	0,14	0,10	+0,15	+0,48	-0,40	-0,25	0,56
24	220	АС-400	390,73	390	19,39	20,2	19,34	20,2	9,57	10,69	10,65	9,48	8,36	9,14	8,0	0,02	0,10	-1,12	-0,78	-0,64	-1,76	0,58
25	220	АС-400	387,12	390	20,39	20,2	20,43	20,2	7,00	7,30	7,23	13,26	12,96	12,69	8,0	0,87	0,80	-0,30	+0,27	-0,44	-0,74	0,58
26	220	АС-500	393,95	393	20,31	20,2	20,39	20,2	8,79	9,39	9,35	10,94	10,34	10,22	8,0	0,70	0,77	-0,60	+0,12	-0,56	-1,16	0,58
27	220	АС-500	315,45	320	19,64	19,5	19,73	19,7	10,14	8,75	9,12	9,66	11,05	10,63	8,0	3,97	4,40	+1,39	+0,42	-0,52	+0,77	0,55

Примечание. Величины в таблице приведены в м.

ко, если не принимать во внимание переходы № 7, № 21 и № 24 с наибольшими отклонениями от проекта, то  $\Delta h_2$  не превысит  $\pm 0,5$  м. Таким образом, погрешности строительства оказывают ощутимое влияние на габариты проводов ВЛ.

Рассмотрим приведенные в таблице разности  $\Delta h_2$ . Они довольно велики (от  $-1,77$  до  $+1,58$  м), а предвычисленные допуски  $M$  равны  $0,5-0,6$  м. Это несоответствие может быть объяснено лишь тем, что разности  $\Delta h_2$  вызываются не только ошибками съемки и проектирова-

Кривые эмпирического и нормального распределений частот разностей  $\Delta h_2^0$ , приведенных к одному весу.



ния, но и монтажных работ (неточное натяжение проводов). Кроме того, на величину  $\Delta h_2$  существенно влияет естественная вытяжка проводов в полете.

Для строгого решения вопроса о разделении величин  $\Delta h_2$  на три составляющие необходимы дополнительные исследования, поэтому ограничимся анализом полученных разностей  $\Delta h_2$ .

Согласно рекомендациям Львовского ОКП Энергосетьпроекта, вытяжка проводов АС—95—240 составляет 7%, а проводов АСО—240—500 — 6% от стрелы провеса провода. Были рассчитаны и приведены в таблице вероятные вытяжки проводов  $\psi$  для всех переходов. Так как  $\psi$  оказывает одностороннее воздействие на провод, то ее легко исключить из разностей  $\Delta h_2$ . Полученные остатки  $\Delta h_2^0$  оказались в области от  $-2,23$  до  $+0,97$  м, причем в 19 случаях из 27 с минусом, что говорит о систематическом влиянии. Общая арифметическая середина  $\Delta h_2^0$  равна  $-0,43$  м. Судя по знаку, имеет место перетяжка проводов при их монтаже.

К такому же выводу приходим и на основе статистической обработки величин  $\Delta h_2^0$ . На рисунке, где построены кривые эмпирического и нормального распределений разностей  $\Delta h_2^0$ , заметно выражена асимметрия рассматриваемого ряда распределения, указывающая на присутствие в результатах измерений односторонне действующих ошибок. Показатель асимметрии, вычисленный по формуле [1]

$$S = \frac{\mu_3}{\sigma^3},$$

равен  $-1,45$  и превышает утроенное среднеквадратическое отклонение показателя асимметрии ( $3\sigma_s = \pm 1,41$ ). Эксцесс, вычисленный по формуле [1]

$$E = \frac{\mu_4}{\mu_2^2} - 3,$$

оказался небольшим ( $E = -0,03$ ), тогда как  $\sigma_E = \pm 0,94$ .

Данное распределение отличается от нормального, так как  $|S| > 3\sigma_s$ . Применяя критерий согласия Колмогорова  $K(\lambda)$ , имеем  $1 - K(\lambda) =$

$=0,91242$ . Это значение не соответствует принятому пятипроцентному уровню значимости, следовательно наблюдаемый ряд распределения плохо согласуется с нормальным распределением.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Митропольский А. К. Техника статистических вычислений. М., «Наука», 1971.
2. Сапожникова С. А. Микроклимат и местный климат. Л., Гидрометеодиздат, 1950.
3. Тревого И. С., Золотарев А. А. О статье Г. П. Хохлова «Съемка габаритов ВЛ фотоаппаратом». — «Электрические станции», 1973, № 3.
4. Тревого И. С. К вопросу оценки точности съемки и проектирования переходов ВЛ через воздушные трассы. — «Инженерная геодезия», 1971, вып. 9.
5. Тревого И. С. Поправки за действие ветра и обледенения при съемке пересечений проектируемой ВЛ с воздушными трассами. — «Инженерная геодезия», 1972, вып. 10.
6. Тревого И. С. Расчет поправок в габариты при съемке и проектировании переходов воздушных высоковольтных линий электропередачи. — «Геодезия, картография и аэрофотосъемка», 1972, вып. 15.

Работа поступила в редколлегию 11 мая 1973 года. Рекомендована кафедрой геодезии Львовского политехнического института.