

Схема многоканального преобразователя напряжения в код, схема двоично-десятичного сумматора, выполняющего усреднение, и структурная схема устройства контроля показателей качества электроэнергии защищены авторскими свидетельствами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жежеленко И. В. Основные аспекты проблемы повышения качества электроэнергии в питающих и распределительных электрических сетях.— Изв. вузов СССР — Энергетика, 1983, № 5, с. 11—15.
2. Жежеленко И. В., Липский А. М., Багиев Г. Л. Технические и организационные вопросы повышения качества электроэнергии в промышленных сетях.— Промышленная энергетика, 1983, № 9, с. 7—10.
3. Серийные средства измерения показателей качества электроэнергии / А. К. Шидловский, С. Г. Таранов и др.— Промышленная энергетика, 1983, № 8, с. 19—21.
4. А. с. 838593 (СССР) Устройство для контроля показателей качества электрической энергии в трехфазных сетях / В. С. Каханович, Н. И. Тюшкевич, В. Е. Ткаченко, А. С. Вершинин.— Оpubл. в Б. И., 1981, № 22.
5. Зыкин Ф. А., Каханович В. С. Измерение и учет электрической энергии.— М.: Энергоиздат, 1982.—105 с.

Представлена кафедрой ТОЭ

[13.6.1984]

УДК 621.315.1.072

ПАРАМЕТРЫ КОМПАКТНЫХ УПРАВЛЯЕМЫХ ДВУХЦЕПНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ КОНЦЕНТРИЧЕСКОЙ КОНСТРУКЦИИ

Заслуженный деятель науки и техники БССР, докт. техн. наук, проф. ПОСПЕЛОВ Г. Е., канд. техн. наук, доц. ФЕДИН В. Т., инженеры СЕЛИВЕРСТОВ Г. И., ДУХОВИЧ Г. Л.

Белорусский ордена Трудового Красного Знамени политехнический институт

Данная работа — продолжение исследований электрических параметров линий электропередачи новой конструкции, предложенных в [1]. Эти линии основаны на принципе концентрического попарного расположения проводов расщепленных фаз разных цепей (рис. 1). Сдвиг фаз на угол

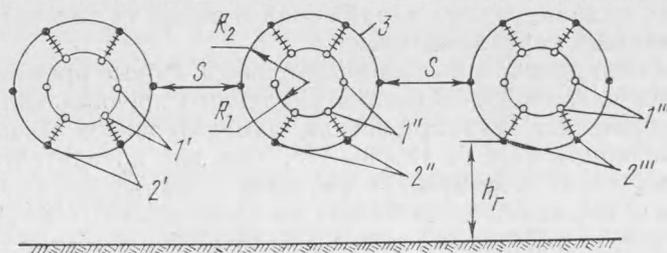


Рис. 1. Схема расположения в пролете фаз компактной управляемой двухцепной линии электропередачи:

1', 1'', 1''' и 2', 2'', 2''' — провода расщепленной фазы соответственно внутренней (1) и наружной (2) цепи линии; R_1 и R_2 — радиус расщепления фазы соответственно цепей 1 и 2; S — наименьшее расстояние между проводами 2' и 2'', 2'' и 2''' разноименных фаз цепи 2; h_{Γ} — габарит проводов до земли; 3 — распорная конструкция проводов сближенных фаз

θ между векторами напряжений, приложенных к проводам попарно сближенных фаз цепей 1 и 2, обеспечивается с помощью фазосдвигающих устройств, установленных по концам каждой или одной из цепей линии.

В таких линиях при регулировании угла Θ сочетаются положительные свойства компактных и управляемых самокомпенсирующихся ЛЭП [2, 3]. Их наибольшая пропускная способность (натуральная мощность) достигается при подведении к проводам попарно сближенных фаз цепей 1 и 2 напряжений, находящихся в противофазе ($\Theta = 180^\circ$) [4].

Методика расчета параметров (индуктивности, емкости, волнового сопротивления и натуральной мощности) линий электропередачи рассматриваемой конструкции приведена в [4]. Там же даны результаты расчета натуральной мощности некоторых вариантов линий напряжением 110—500 кВ.

Цель статьи состоит в оценке возможностей линий электропередачи концентрической конструкции, направленных на повышение пропускной способности, обеспечение допустимого экологического влияния по напряженности электрического поля и регулирование режимов.

Расчет параметров линий выполнялся по методике [5, 4] с использованием ЕС ЭВМ по следующему алгоритму.

Заданы класс напряжения, конструкция линии, количество и начальные радиусы проводов в фазах; ряд стандартных радиусов проводов; координаты проводов — радиусы R_1 и R_2 сближенных фаз и параметры h_r и S . Расстояние между соседними проводами сближенных фаз принимается согласно [3]. При максимальном угле Θ поочередно определяется напряженность поля E_i на поверхности проводов каждой цепи. При превышении напряженности E_i допустимой величины по условию ограничения коронного разряда и уровня создаваемых радиопомех выбираются необходимые радиусы проводов из стандартного ряда. Рассчитываются максимальное значение напряженности поля E_z под линией на уровне 1,8 м над землей, индуктивность, емкость и другие параметры цепей 1 и 2. С шагом $\Delta\Theta$ определяются параметры линии при других углах Θ .

Напряженность электрического поля в любой точке пространства рассчитана по выражению [5]

$$E = (E_y^2 + E_z^2)^{1/2},$$

где E_y , E_z — соответственно горизонтальная и вертикальная составляющие градиента электрического поля, определяемые по формулам

$$E_y = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left[\left(\sum_{i,j=1}^{n_1, n_2} B_{i,j} \operatorname{Re} \dot{q}_{i,j} \right)^2 + \left(\sum_{i,j=1}^{n_1, n_2} B_{i,j} \operatorname{Im} \dot{q}_{i,j} \right)^2 \right]^{1/2};$$

$$E_z = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left[\left(\sum_{i,j=1}^{n_1, n_2} A_{i,j} \operatorname{Re} \dot{q}_{i,j} \right)^2 + \left(\sum_{i,j=1}^{n_1, n_2} A_{i,j} \operatorname{Im} \dot{q}_{i,j} \right)^2 \right]^{1/2}.$$

Здесь $A_{i,j}$, $B_{i,j}$ — коэффициенты, определяемые геометрическими расстояниями;

$\operatorname{Re} \dot{q}_{i,j}$ и $\operatorname{Im} \dot{q}_{i,j}$ — вещественные и мнимые составляющие соответственно заряда \dot{q}_i i -го провода цепи 1 и заряда \dot{q}_j j -го провода цепи 2;

n_1 и n_2 — число проводов соответственно цепей 1 и 2;

ϵ_0 — электрическая постоянная.

В процессе расчета определялась действительная часть выражения полной натуральной мощности цепей 1 и 2

$$P_{\text{нат}1} = \operatorname{Re}(U^2/\dot{Z}_{\text{з}1}); \quad P_{\text{нат}2} = \operatorname{Re}(U^2/\dot{Z}_{\text{з}2}).$$

Здесь U — напряжение линии, равное напряжению цепей ($U = U_1 = U_2$);

$\dot{Z}_{\text{з}1}$ и $\dot{Z}_{\text{з}2}$ — эквивалентные волновые сопротивления фазы соответственно цепей 1 и 2, определяемые без учета активного сопротивления проводов и поперечной активной проводимости по выражениям

$$\dot{Z}_{\text{з}1} = (\dot{L}_{\text{з}1}/\dot{C}_{\text{з}1})^{1/2}; \quad \dot{Z}_{\text{з}2} = (\dot{L}_{\text{з}2}/\dot{C}_{\text{з}2})^{1/2},$$

где $L_{э1}$ и $C_{э1}$, $L_{э2}$ и $C_{э2}$ — соответственно эквивалентная индуктивность и емкость фазы цепей 1 и 2.

Кроме того, выполнена оценка рабочих параметров линии — $L_{э1}$ и $C_{э1}$ ($\text{Re } L_{э1}$ и $\text{Re } C_{э1}$), $L_{э2}$ и $C_{э2}$ ($\text{Re } L_{э2}$ и $\text{Re } C_{э2}$).

Исследования проводились при следующих исходных условиях: расщепленные фазы цепей линии расположены горизонтально (рис. 1); число проводов в цепях $n_1 = n_2$ и сближенных фазах $n_1' = n_2' = n$ и т. д. и их сечение одинаково; параметры $R_2 - R_1$, S , h_r для конструкций линий одного класса напряжения постоянны и составляют для 110 кВ соответственно 0,8; 5 и 6,5 м; для 220 кВ — 1,7; 6,5 и 7 м; для 330 кВ — 2,3; 7 и 7,5 м; для 500 кВ — 3,6; 8 и 8 м.

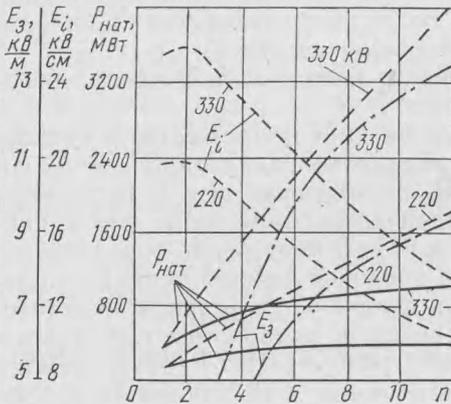


Рис. 2. Зависимость натуральной мощности, максимальной напряженности поля на проводах E_i и под линией E_3 от количества составляющих в расщепленных фазах при $R_1 = 0,2$ м и параметрах линий 220 кВ: провода АС400/22, $R_2 = 1,9$ м; линий 330 кВ; провода АС500/64, $R_2 = 2,5$ м:

— — цепь 1, - - - - цепь 2;
нижняя линия соответствует напряжению 220 кВ

В [4] представлены зависимости натуральной мощности двух цепей линий 110—500 кВ при $\Theta = 180^\circ$, $R_1 = 0,2$ м и изменении числа проводов в фазах от 1 до 12. Они имеют практически линейный вид. Степень нелинейности определяется величиной $P_{\text{нат}}$ цепи 1 (рис. 2). Величина $P_{\text{нат1}}$ с ростом параметра n изменяется незначительно. Например, при $n = 6$ отношение натуральных мощностей цепей 2 и 1 для линий 220 и 330 кВ равно соответственно 2,5 и 2,6; при $n = 12$ — 4,0 и 4,2 (табл. 1). Аналогичный показатель при $n = 12$ для линии 110 кВ составляет 3,1.

Линейность зависимости $P_{\text{нат2}} = f(n)$ объясняется компенсацией взаимной индуктивности $\Sigma M_{j'j'}$ и емкости $\Sigma C_{j'j'}$ между проводами своей фазы взаимной индуктивностью ΣM_{ij} и емкостью ΣC_{ij} (имеющих противоположные знаки) между проводами сближенных фаз. В свою очередь преобладающий рост значений $\Sigma M_{i'j'}$ и $\Sigma C_{i'j'}$ между проводами цепи 1 над ростом значений ΣM_{ij} и ΣC_{ij} между проводами сближенных фаз определяет нелинейность зависимости $P_{\text{нат1}} = f(n)$.

С увеличением числа проводов в фазе при $\Theta = 180^\circ$ напряженность поля на них снижается, а под линией возрастает (рис. 2). Напряженность под линией определяется конструкцией сближенных фаз, у которой радиус R_2 больше радиуса R_1 . При $R_1(R_2) = \text{const}$, $n = \text{var}$ величина E_3 определяется некомпенсированным полем фаз цепи 2. Для линий 220 и 330 кВ при $R_1 = 0,2$ м и увеличении числа проводов в фазах с 6 до 12 она возрастает на 38 % (табл. 1), для линий 110 кВ при тех же условиях — на 40 %. Причем только у линии 330 кВ с $n = 10$ и более напряженность поля превышает значение E_3 линии 500 кВ традиционного исполнения с $h_r = 8$ м. У линии 500 кВ с $n = 12$ максимальная напряженность соответствует величине E_3 традиционной линии 750 кВ.

Снижение напряженности поля под линией можно обеспечить не только за счет повышения параметра h_r , но и путем увеличения радиусов R_1 и R_2 сближенных фаз. В этом случае, во-первых, при $h_r = \text{const}$ увеличивается габарит общей точки расщепленных фаз, сближенных между

Параметры линий электропередачи 110—500 кВ

U, кВ	Марка провода	n	R _л , м	θ, град	Цепь 1					Цепь 2					
					$L_3 \cdot 10^{-4}$, Гн/км	$C_3 \cdot 10^{-9}$, Ф/км	Z ₃ , Ом	P _{нат} , МВт	E _т , кВ/см	$L_3 \cdot 10^{-4}$, Гн/км	$C_3 \cdot 10^{-9}$, Ф/км	Z ₃ , Ом	P _{нат} , МВт	E _т , кВ/см	
110	АС95/16	6	0,2	180 0	3,84 12,56	43,08 5,20	94,0 491,4	128 24	13,1 1,7	1,15 9,88	56,18 18,29	45,3 232,4	267 52	16,4 6,1	2,7 5,0
			1,0	180 0	2,32 9,54	60,69 10,37	61,8 303,2	195 39	17,3 3,3	1,34 8,59	68,79 18,47	44,1 215,6	274 56	19,9 6,2	1,6 5,7
220	АС400/22	6	0,2	180 0	4,86 12,54	34,89 4,88	117,9 506,5	410 95	11,4 1,7	1,13 8,84	52,34 22,24	45,5 199,3	1039 242	15,3 7,3	6,8 10,6
			1,0	180 0	4,56 12,24	42,98 2,56	103,0 691,4	469 70	8,5 0,5	0,45 8,16	68,68 28,26	25,6 169,9	1887 284	10,2 4,8	9,4 11,3
330	АС500/64	6	1,0	180 0	2,96 9,71	51,31 9,12	75,9 326,3	637 148	15,2 2,9	1,23 8,03	64,51 22,32	43,6 189,6	1108 255	19,6 7,8	4,6 11,3
			0,2	180 0	2,36 9,16	76,01 6,08	55,7 388,1	868 124	11,5 1,0	0,49 7,36	99,70 29,83	22,2 157,0	2172 308	15,0 6,2	8,2 12,9
500	АС500/64	12	0,2	180 0	5,37 12,56	31,50 4,96	130,6 502,9	833 216	13,9 2,8	1,19 8,42	50,27 23,73	48,6 188,3	2239 578	20,1 10,6	9,8 15,0
			1,0	180 0	5,11 12,30	38,57 2,65	115,1 680,4	946 160	10,7 0,7	0,49 7,71	66,39 30,48	26,8 159,1	4057 684	13,4 7,1	13,6 16,2
500	АС500/64	12	0,2	180 0	2,71 9,30	66,56 5,72	63,8 403,1	1708 270	13,8 1,3	0,52 7,18	92,41 31,57	23,8 150,8	4569 721	18,5 7,8	12,3 18,2
			1,0	180 0	5,94 12,50	32,22 2,91	135,7 655,2	1842 381	13,6 1,3	0,55 7,18	63,17 33,86	29,5 145,6	8477 1717	19,8 12,0	20,0 23,7

собой, во-вторых, степень повышения величины электрического заряда фаз цепи 1 превышает степень роста заряда фаз цепи 2. Например, для линии 110 кВ с $n=12$ увеличение R_1 от 0,2 до 1,0 м приводит к уменьшению величины E_3 от 5,2 до 3,2 кВ/м. При этом чем меньше проводов в фазах, тем в большей степени проявляется эффект снижения напряженности.

На увеличение радиусов R_1 , R_2 сближенных фаз линий 330 кВ и выше при $n=\text{const}$ накладываются ограничения по короне на проводах (и в первую очередь цепи 2) и создаваемым линиями радиопомехам. Этим ограничениям во всем диапазоне изменения n ($n=1\div 12$) при увеличении R_1 до 1,0 м удовлетворяют сечения проводов для ВЛ 110 и 220 кВ соответственно АС 95/16 и АС 400/22. Провод марки АС 500/64 является минимально допустимым для ВЛ 330 кВ только при $n=6$, для ВЛ 500 кВ — при $n=12$ (рис. 2 и табл. 1). Применение проводов сечением АС 700/86 в варианте линии 330 кВ с $n=6$, $R_1=1,0$ м не дает желаемого результата, поскольку параметр E_i на проводах цепи 2 достигает величины, равной 20,3 кВ/см, что выше допустимой. В свою очередь при $R_1=0,2$ м, например, для линий 110 и 220 кВ с $n>2$ и 330 кВ с $n>7$ могут быть использованы провода меньшего сечения (рис. 2).

Как следует из табл. 1, увеличение радиуса R_1 при $\Theta=180^\circ$ за счет уменьшения взаимного влияния проводов внутри фазы своей цепи приводит к росту величины $P_{\text{нат}1}$. Одновременно с этим снижается взаимное влияние проводов цепи 2, а также сближенных фаз цепей 1 и 2. Этим объясняется практическое постоянство величины $P_{\text{нат}2}$. Таким образом, видно, что натуральная мощность цепи 2 находится в прямой зависимости от числа проводов в сближенных фазах и практически не зависит от радиуса расщепления фазы. Например, для линии 220 кВ с $n=6$ при изменении R_1 от 0,2 до 1,0 м увеличение натуральной мощности по цепям 1 и 2 составило соответственно 55 и 6% (табл. 1).

Диапазон изменения параметров L_3 , C_3 и т. д. при регулировании угла Θ определяется взаимным влиянием проводов в фазах и радиусами R_1 и R_2 сближенных фаз. Наибольший интерес в этом плане представляет изменение емкости цепей линии, определяющей зарядную мощность последней. Как показывает анализ, при прочих равных условиях число проводов в фазах линии практически не влияет на диапазон изменения C_{32} при регулировании угла Θ в пределах $0\div 180^\circ$. С ростом числа проводов увеличиваются только значения нижнего и верхнего пределов C_{32} . В этом случае верхний предел C_{31} также растет, а нижний — уменьшается. Это и определяет широкий диапазон изменения емкости C_{31} цепи 1.

Наиболее существенным средством повышения величины верхнего предела изменения емкости линии является увеличение радиуса R_1 фазы цепи 1. Например, для линии 330 кВ с $n=12$ при изменении R_1 от 0,2 до 1,0 м величина верхнего предела C_{32} возросла на 39%, C_{31} — на 72%, при этом нижние пределы C_{32} и C_{31} практически не изменяются (табл. 1).

Закономерности, установленные в отношении емкостей каждой цепи, характерны и для индуктивностей с той лишь разницей, что при регулировании угла Θ диапазон изменения L_{32} значительно шире, чем L_{31} .

При регулировании режима работы электропередачи во всем диапазоне изменения угла при $\Theta=0$ сближенные фазы приобретают электрические заряды одного знака. Это приводит к существенному росту напряженности поля под линиями. Причем при прочих равных условиях, чем больше радиус расщепления фаз цепи 1, тем выше значение E_3 (табл. 1). Поэтому задача выбора ширины диапазона регулирования параметров линии и минимальных габаритов проводов до земли должна решаться на основании технико-экономических расчетов, проведение которых выходит за рамки данной статьи.

ВЫВОДЫ

1. Естественная мощность компактных управляемых линий концентрической конструкции при равном числе проводов в фазах в режиме противофазы определяется в основном числом проводов в фазах внешней цепи, естественная мощность которой пропорциональна числу проводов в фазах и практически не зависит от радиуса расщепления своих фаз.

2. Максимальные значения напряженности поля под линиями 110—500 кВ с габаритами проводов традиционных линий в режиме противофазы получены для случая наибольшего количества проводов ($n=12$) в фазах и наименьшего радиуса их расщепления, равного 0,2 м, и составляют 5,2 кВ/м для ВЛ 110 кВ; 9,4 кВ/м — ВЛ 220 кВ; 13,6 кВ/м — ВЛ 330 кВ; 20,0 кВ/м — ВЛ 500 кВ.

3. Диапазон изменения электрических параметров линий при регулировании угла фазового сдвига тем шире, чем больше проводов в фазах и радиус расщепления фаз внутренней цепи.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. с. 847420 (СССР) Двухцепная линия электропередачи / Г. Е. Поспелов, В. Т. Федин, М. С. Чернецкий.— Оубл. в Б. И., 1981, № 27.
2. Александров Г. Н. Воздушные линии электропередачи повышенной пропускной способности.— Электричество, 1981, № 7, с. 1—6.
3. Основные принципы создания и технические характеристики управляемых самокомпенсирующихся линий электропередач / Ю. Н. Астахов, В. А. Веников, В. М. Постолатий и др.— Электричество, 1977, № 12, с. 37—44.
4. Поспелов Г. Е., Федин В. Т., Чернецкий М. С. Воздушные двухцепные линии электропередачи повышенной естественной мощности.— В кн.: 28. Inter. Wiss. Koll. TH Vortragsreihe Betriebsmittel und Anlagengestaltung für den Elektroenergietransport.— Ilmenau, 1983, s. 293—296.
5. Постолатий В. М., Путятин С. П. Возможности снижения экологического влияния линий электропередачи переменного тока за счет новых конструктивных и схемных изменений.— Изв. АН Молд. ССР. Сер. физ.-техн. и мат. наук. Кишинев: Штиинца, 1978, № 1, с. 73—79.

Представлена кафедрой
электрических систем

[16.5.1984]

УДК 621.316.35.064.1

ВИБРАЦИЯ ПРОВОДОВ ВОЗДУШНЫХ ЛЭП

Канд. физ.-мат. наук, доц. ВАНЬКО В. И.

Московское высшее техническое училище имени Н. Э. Баумана

При расчете проводов ЛЭП и оценке частот собственных колебаний провод рассматривается как абсолютно гибкая нить с нулевой стрелой начального провисания [1, 2].

В предлагаемой работе строится механическая модель вибраций провода с учетом его реальных механических и геометрических свойств — жесткостей на изгиб и кручение и стрелы начального провисания.

Пусть декартова система координат $OXYZ$ с ортонормированным базисом $\{i, j, k\}$ имеет начала в середине пролета длиной L (рис. 1). Положение оси провода в состоянии статического равновесия известно: $z = \omega_0(x)$, $-L/2 \leq x \leq L/2$. Перемещение точки оси провода с координатой x в процессе движения зададим вектором

$$\Theta(x, t) = u(x, t)i + v(x, t)j + w(x, t)k;$$