

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЕДЕЛЬНО КОМПАКТНЫХ УПРАВЛЯЕМЫХ САМОКОМПЕНСИРУЮЩИХСЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЛИНИЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 330-500 кВ

Постолатий В.М., Суслов В.М.  
Институт энергетики АН Молдовы

**Аннотация.** Определена оптимальная конфигурация расположения фаз двухцепных компактных управляемых самокомпенсирующихся высоковольтных линий электропередачи (КУСВЛ) напряжением 330-500 кВ по условию достижения максимально допустимой величины напряженности электрического поля на поверхности расщепленных фаз при заданной их конструкции. Рассчитаны параметры данных линий при крайних значениях углового сдвига ( $\theta$ ) между системами векторов напряжений цепей. Показано, что величина волнового сопротивления КУСВЛ без применения специальных фазоповоротных устройств (ФПУ) (то есть при  $\theta=0^\circ$ ) минимальна и составляет (для каждой фазы) для варианта 330 кВ с проводами 3хАС-300/39–196 Ом, а для 500 кВ с проводами в фазе 6хАС-240/39 – 162 Ом. Величина натуральной мощности рассмотренных линий (на обе цепи) при номинальном напряжении при этом максимальна и составляет 1118 МВт (для линии 330 кВ) и 3080 МВт (для линии 500 кВ). При переводе линий в режим угла  $\theta = 180^\circ$  (с помощью специальных ФПУ) волновое сопротивление максимально, а пропускная способность минимальна. Отношение максимальной величины натуральной мощности к минимальной при этом (регулируемый диапазон) достигает значения до 1,5.

**Ключевые слова:** Компактность, управляемость, самокомпенсация, линия электропередачи, волновое сопротивление, натуральная мощность, оптимизация конструкции, напряженность электрического поля.

### CARACTERISTICILE LINIILOR DIRIJATE ŞI DE AUTOCOMPENSARE EXTREM DE COMPACTE DE TENSIUNE ÎNALTĂ 330-350 kV

Postolatii V.M., Suslov V.M.

Institutul de Energetică al Academiei de Ştiinţe a Moldovei

**Rezumat.** Este determinată configurația optimă a fazelor liniilor electrice dirijate compacte cu circuitul dublu, autocompensate, de tensiune înaltă 330-500 kV ( KUSVL), cu condiția atingerii valorii maxime admisibile a tensiunii câmpului electric pe suprafața fazelor divizate pentru designul lor definit. Sunt calculați parametrii acestor linii pentru valorile extreme ale decalajului de fază ( $\theta$ ) între sistemele vectoriale ale tensiunelor circuitelor. Este arătat, că valoarea impedanței caracteristice a KUSVL fără utilizarea dispozitivelor speciale de rotație a fazei (adică la  $\theta = 0^\circ$ ) este minimală, și constituie (pentru fiecare fază) pentru opțiunea liniei cu tensiunea 330 kV și fire 3AS-300/39 -196 Ohmi, iar pentru linia 500 kV cu conductoarele de fază 6AS-240/39 - 162 Ohmi. Valoarea puterii caracteristice liniilor considerate (pentru ambele circuite) la tensiunea nominală este cea maximă și constituie 1118 MW (pentru linia 330 kV ) și 3080 MW (pentru linia 500 kV). La trecerea liniei la unghiul  $\theta = 180^\circ$  (cu ajutorul aparatelor speciale de decalaj de fază) impedanța caracteristică este maximală, iar capacitatea de transmisie - minimă. Relația între valoarea maximală a capacității de transmisie și valoarea minimală (coeficientul de reglare) atinge valori de până la 1,5.

**Cuvinte-cheie:** Compactă, dirijabilă, auto-compensare, linia de transmisie a puterii electrice, puterea caracteristică, optimizarea de construcție, intensitatea câmpului electric.

### CHARACTERISTICS OF POWER SELF-COMPENSATED TRANSMISSION LINES EXTREMELY COMPACT 330-350 kV

Postolatii V.M., Suslov V.M.

Power Engineering Institute of Moldova Academy of Sciences

**Abstract.** The optimal configuration of phases placement of double circuit compact controlled self-compensated high-voltage power lines (KUSVL ) with the voltage of 330-500 kV at the condition of achieving of the maximum admissible value of the electric field tension on the surface of split phase at a given design was determined. The parameters of these lines at the extreme values of the angular shift ( $\theta$ ) between the circuits' systems voltages were calculated. It was shown, that the surge impedance of KUSVL without special phase-shifting transformers (e.g.  $\theta = 0^\circ$ ) is minimal, and is equal (for each phase) for the option of 330 kV and wires 3AS-300/39 - 196 ohms, and for voltage of 500 kV and phase conductors 6AS-240/39 –162 ohms. The magnitude of transmission capacity of

considered line (for both circuits) at rated voltage is maximal and equal to 1118 MW (for 330 kV line) and 3080 MW (for 500 kV line). At changing of line to the mode of angle  $\theta = 180^\circ$  (with special phase-shifting transformer) surge impedance is maximal and the transmission capacity minimal. Ratio of the maximal value of transmission capacity to the minimal (regulation range) reaches values of up to 1.5.

**Keywords:** Compact, controllability, self-compensation, power transmission line, surge-impedance power, design optimization, the electric field strength.

### **Введение**

К настоящему времени выполнен большой комплекс работ в области управляемых самокомпенсирующихся высоковольтных линий электропередач (УСВЛ) различных классов напряжения с различной конфигурацией расположения фаз на опоре [1-3]. В этих работах показано, что величина натуральной мощности УСВЛ в 1,4-1,6 раза больше, чем у обычных линий того же класса напряжения (в расчете на одну цепь). Кроме того, УСВЛ позволяют путем изменения углового сдвига между системами векторов напряжений цепей регулировать их эквивалентные параметры до 1,5-кратной величины. В выполненных ранее работах, в основном, исследовались варианты линий с горизонтальным расположением фаз при попарном сближении фаз разных цепей и при общепринятых расстояниях между остальными фазами.

### ***Цель работы***

В настоящей работе исследованы новые конфигурации УСВЛ с предельно компактным расположением всех фаз линии (по кругу) напряжением 330- 500 кВ.

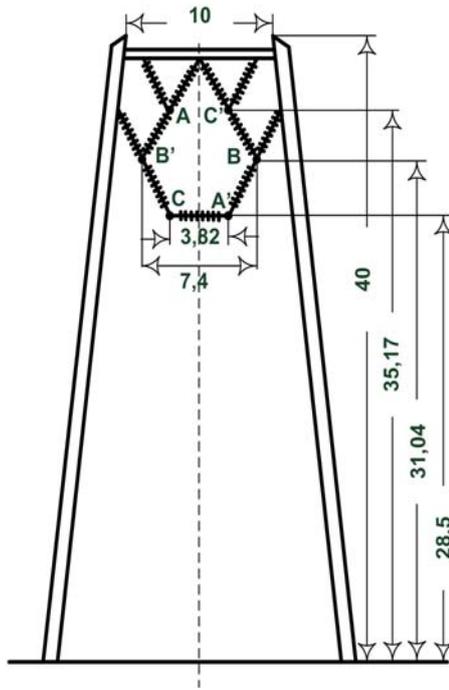
### **1. Результаты исследований.**

На примере двухцепных КУСВЛ классов напряжения 330-500 кВ выполнены оптимизационные расчеты взаимного расположения фаз при задании максимально допустимой величины напряженности электрического поля на поверхности проводов для всех фаз (при недопущении коронного разряда при нормальных климатических условиях эксплуатации, в соответствии с требованиями ПУЭ).

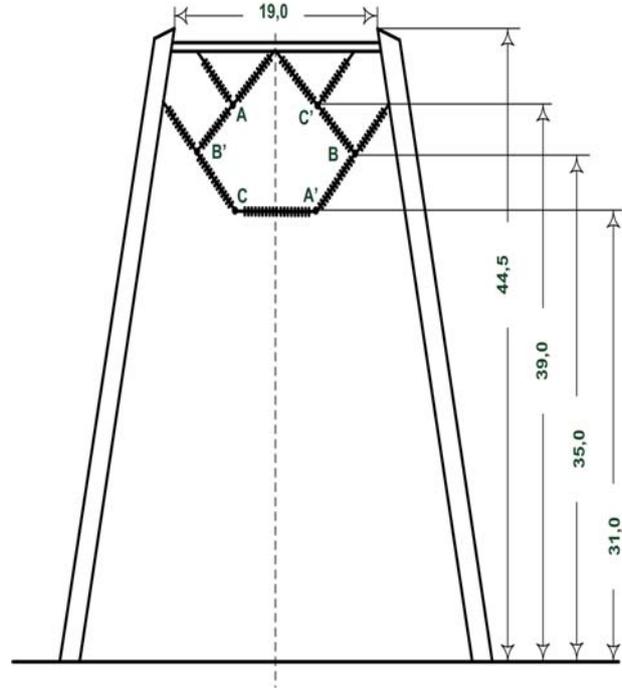
В качестве рассматриваемых приняты КУСВЛ 330 кВ с проводами в фазах 3хАС-330/39 и КУСВЛ-500 кВ с проводами 6хАС-240/39. Рассматриваемые варианты новых предельно компактных конфигураций расположения фаз данных вариантов КУСВЛ представлены на рис 1-2. На них буквами А, В,С обозначены фазы 1-й цепи, а буквами А', В', С' – фазы

2-й цепи. Конфигурация расположения фаз принята по кругу. При этом сближенными являются фазы разных цепей, а одноименные фазы разных цепей максимально возможно, для данной конфигурации, удалены друг от друга.

PROBLEMELE ENERGETICII REGIONALE 3(23) 2013  
ELECTROENERGETICĂ



*Рис. 1. Двухцепная компактная  
УСВЛ -330кВ*



*Рис. 2. Двухцепная компактная  
УСВЛ -500кВ*

Оптимизации проводилась в среде EXCEL по специально разработанному алгоритму. Суть данного алгоритма состоит в следующем.

В качестве исходных для каждого варианта линии взяты следующие данные:

- 1) Максимальная нормативная напряженность электрического поля на поверхности проводов фаз.
- 2) Номинальное напряжение линии.
- 3) Радиусы проводов.
- 4) Количество составляющих и радиус расщепления фаз.
- 5) Стрелы провесов фаз.
- 6) Координаты расположения фаз на опорах (X - берется относительно центральной оси опоры, а Y - относительно поверхности земли).

Суть разработанного алгоритма состоит в следующем:

1. Фиксируется конструкция расщепленных фаз.
2. Фиксируется габарит линии.
3. Задается первоначальное расположение фаз линии.
4. Задается требуемое ограничение на минимальную величину сближения фаз между собой.
5. Задается условие симметрии расположения фаз.
6. Задается требуемое ограничение на максимальную величину напряженности электрического поля на поверхности проводов фаз линии.
7. Выполняется оптимизация взаимного расположения фаз по критерию максимизации напряженностей электрического поля на поверхности всех проводов всех фаз линии с учетом всех заданных ограничений. (При этом обеспечивается максимально возможная и равная между собой рабочая емкость всех фаз).

Результаты оптимизационных расчетов приведены в таблицах 1-2, а параметры при крайних углах сдвига систем векторов напряжений цепей ( $0^{\circ}$ - $180^{\circ}$ ) в таблицах 1-4.

PROBLEMELE ENERGETICII REGIONALE 3(23) 2013  
ELECTROENERGETICĂ

Эквивалентные параметры и характеристики КУСВЛ приведены в нижних частях таблиц.

Для указанных оптимизированных вариантов емкостная проводимость и индуктивное сопротивление приведены для каждой фазы на единицу длины линий, а волновое сопротивление и натуральная мощность на каждую цепь линий.

*Таблица 1*

*Таблица оптимизации двухцепной КУСВЛ-330 кВ с проводами 3хАС-330/39*

Нормативная напряженность, кВ/см		28											
Номинальное напряжение, кВ		363											
Радиус провода, мм		12											
Количество расщеплений фазы		3											
Радиус расщепления фазы, м		0,25											
Стрела провеса, м		20,5											
Координаты проводов, м													
	Начальные (до оптимизации)						Конечные (после оптимизации)						
X	-1,5	4,5	-1,5	1,5	-4,5	1,5	-1,91	3,708	-1,92	1,917	-3,71	1,907	
Y	34	31	28,5	28,5	31	34	35,17	31,84	28,5	28,5	31,84	35,17	
Емкостная проводимость, мкСм/км		5,41											
Индуктивное сопротивление, Ом/км		0,21											
Волновое сопротивление, Ом		195,9											
Натуральная мощность, МВт		672,8											

*Таблица 2*

*Таблица оптимизации параметров двухцепной КУСВЛ-500 кВ с проводами 6хАС-240/39*

Нормативная напряженность, кВ/см		28											
Номинальное напряжение, кВ		525											
Радиус провода, мм		10,8											
Количество расщеплений фазы		6											
Радиус расщепления фазы, м		0,4											
Стрела провеса, м		23											
Координаты проводов, м													
	Начальные (до оптимизации)						Конечные (после оптимизации)						
X	-1,5	4,5	-1,5	1,5	-4,5	1,5	-1,91	3,708	-1,92	1,917	-3,71	1,907	
Y	34	31	28,5	28,5	31	34	35,17	31,84	28,5	28,5	31,84	35,17	
Емкостная проводимость, мкСм/км		6,51											
Индуктивное сопротивление, Ом/км		0,17											
Волновое сопротивление, Ом		162,2											
Натуральная мощность (на цепь) МВт		1699,6											

*Таблица 3*

*Параметры оптимизированной КУСВЛ-330 кВ с проводами 3хАС-330/39*

Номинальное напряжение, кВ		330											
Угол сдвига фаз между цепями		0											
Радиус троса, мм		5,7											
Радиус провода, мм		12											
Количество расщеплений фазы		3											
Радиус расщепления фазы, м		0,25											
Стрела провеса, м		20,5											
Абсцисса тросов и проводов, м													
	-5	5	-1,9	3,7	-1,9	1,9	-3,7	1,9					

PROBLEMELE ENERGETICII REGIONALE 3(23) 2013  
ELECTROENERGETICĂ

Ордината троса/ов и проводов, м							
40	40	35	32	28,5	28,5	32	35
<b>Параметры КУСВЛ при угле сдвига фаз напряжений между цепями, равном 0°.</b>							
Модуль напряженности электрического поля (кВ/см)		25,94	25,58	25,31	25,31	25,58	25,94
Емкостная проводимость, мкСм/км					5,45		
Индуктивное сопротивление, Ом/км					0,207		
Волновое сопротивление, Ом					194,8		
Натуральная мощность, МВт					559		
Угол сдвига фаз между цепями, град.					180		
<b>Параметры КУСВЛ при угле сдвига фаз напряжений между цепями, равном 180°.</b>							
Модуль напряженности электрического поля (кВ/см)		18,44	18,13	18,16	18,16	18,13	18,44
Емкостная проводимость, мкСм/км					3,88		
Индуктивное сопротивление, Ом/км					0,294		
Волновое сопротивление, Ом					275,2		
Натуральная мощность ( на цепь), МВт					395,7		

Таблица 4

**Параметры оптимизированной КУСВЛ-500 кВ с проводами 6хАС-240/39**

Номинальное напряжение, кВ								500
Угол сдвига фаз между цепями								0
Радиус троса, мм								5,7
Радиус провода, мм								10,8
Количество расщеплений фазы								6
Радиус расщепления, м								0,4
Стрела провеса, м								23
Абсцисса тросов и проводов, м								
-9,5	9,5	-2,5	5,5	-2,5	2,5	-5,5	2,5	
Ордината тросов и проводов, м								
44,5	44,5	39	35	31	31	35	39	
<b>Параметры КУСВЛ при угле сдвига фаз напряжений между цепями, равном 0°.</b>								
Модуль напряженности электрического поля (кВ/см)		26,69	26,54	26,7	26,7	26,54	26,7	
Емкостная проводимость, мкСм/км					6,50			
Индуктивное сопротивление, Ом/км					0,171			
Волновое сопротивление, Ом					162,4			
Натуральная мощность (на цепь), МВт					1540			
Угол сдвига фаз между цепями					180			
<b>Параметры КУСВЛ при угле сдвига фаз напряжений между цепями, равном 180°.</b>								
Модуль напряженности электрического поля (кВ/см)		18,32	17,42	18,59	18,59	17,42	18,32	
Емкостная проводимость, мкСм/км					4,42			
Индуктивное сопротивление, Ом/км					0,258			
Волновое сопротивление, Ом					241,5			
Натуральная мощность (на цепь), МВт					1035			

## 2. Регулировочный диапазон изменения параметров КУСВЛ классов напряжения 330-500 кВ

Новое качество УСВЛ любого типа состоит в возможности в достаточно широких пределах регулировать их эквивалентные параметры путем изменения углового сдвига систем векторов напряжений цепей в пределах от 0 до 180 градусов. Количественной характеристикой этой возможности является регулировочный диапазон, который определяется соотношением эквивалентных параметров этих линий при двух предельных величинах этого угла (0 и 180 градусов).

Указанный диапазон определяется коэффициентом, равном отношению волновых сопротивлений по формуле:

$$k_p = \frac{z_e^{180}}{z_e^0},$$

где  $z_e^{180}$  – волновое сопротивление линии (на цепь) при  $\theta=180^\circ$ ,  
 $z_e^0$  – волновое сопротивление линии (на цепь) при  $\theta=0^\circ$ ,  
 $k_p$  – коэффициент регулирования.

Здесь следует отметить следующее.

Из данных, приведенных выше в соответствующих таблицах, видно, что указанный коэффициент регулирования находится в пределах 1,4-1,5, что свидетельствует о том, что диапазон регулирования КУСВЛ не уступает этому же показателю для ранее рассмотренным вариантам УСВЛ с горизонтально расположенными попарно сближенными фазами.

Особенностью данного варианта является противоположный характер изменения пропускной способности при регулировании угла сдвига систем векторов напряжений цепей (максимум пропускной способности у КУСВЛ при угле  $\theta=0^\circ$ , а минимум – при угле  $\theta=180^\circ$ ; а у УСВЛ с горизонтальным расположением попарно сближенных фаз – максимум пропускной способности при  $\theta=180^\circ$ , а минимум -  $\theta=0^\circ$ .)

Кроме того, достоинствами КУСВЛ с круговым расположением фаз являются во первых то, что максимальная пропускная способность достигается при естественном (без применения дополнительных фазосдвигающих устройств) нулевом сдвиге систем векторов напряжений цепей, а во вторых то, что обеспечивается максимально возможная компактность линии в целом, особенно в отношении величины ее полосы отчуждения (под строительство).

### Выводы

1. Предлагаемая новая компактная конструкция двухцепной УСВЛ с максимально возможно сближенными фазами, расположенными по кругу, при противостоянии одноименных фаз разных цепей является наиболее компактной по сравнению с другими вариантами УСВЛ.

2. Регулировочный диапазон данного варианта не уступает другим вариантам УСВЛ.

3. Особенностью вариантов КУСВЛ является то, что максимум пропускной способности у них достигается при угле  $\theta=0^\circ$ , а минимум – при угле  $\theta=180^\circ$ , т.е. КУСВЛ с круговым расположением фаз обладает противоположным характером изменения пропускной способности при регулировании угла сдвига систем векторов напряжений цепей по сравнению с УСВЛ с горизонтальным расположением фаз.

*Литература*

- [1] Ю.Н. Астахов, В.М. Постолатий, И.Т. Комендант, Г.В. Чалый. Управляемые линии электропередачи. Под редакцией профессора В.А. Веникова. Кишинев, «Штиинца», 1984.
- [2] В.М. Постолатий, Е.В. Быкова. Эффективность применения управляемых самокомпенсирующихся высоковольтных линий электропередачи и фазорегулирующих устройств трансформаторного типа. Электричество, №2, 2010, стр. 7-14.
- [3] Шакарян Ю.Г., Тимашева Л.В., Кареева С.Н., Постолатий В.М., Быкова Е.В., Суслов В.М. Технические аспекты создания и режимные особенности работы в энергосистемах компактных управляемых ВЛ 220-500 кВ. «ТРАВЭК», 8-9 ноября 2011.

**Сведения об авторах**



**Постолатий В.М.**, гл.н.с., академик АН Молдовы, д.т.н. Область научных интересов: энергетические системы, управляемые линии электропередачи переменного тока повышенной пропускной способности, проблемы передачи энергии, режимы энергетических систем, переходные электромеханические процессы, электрические станции, теплоэнергетика, экономика энергетики, вопросы управления энергетическим комплексом.



**Суслов В.М.**, окончил Кишиневский политехнический институт в 1972 г. Научный сотрудник, область научных интересов связана с электропередачами переменного тока повышенной пропускной способности, их влиянием на окружающую среду, режимами энергетических систем, переходными электромеханическими процессами, моделированием в энергетических системах.