

# ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ЕНЭС РОССИИ

АВТОРЫ:

ФОКИН В. К.,  
К.Т.Н.,  
ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

ФИЛАТОВА Л. К.  
ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

В конце 80-х гг. прошлого столетия наряду с понятием «управляемые линии электропередачи» (controlled line) появилась аббревиатура FACTS, которая расшифровывается как Flexible Alternating Current Transmission Systems, что в переводе с английского на русский означает «гибкие электропередачи переменного тока» (ГЭПТ). Впервые термин FACTS был озвучен в стенах Института инженеров-электриков США (EPRI) [2–4] в 1986–1988 гг. и стал применяться при исследо-

ваниях связей переменного тока с управляемыми компенсирующими и регулируемыми устройствами на основе преобразователей напряжения с использованием полностью управляемых тиристорных вентилей или – позднее – силовых высоковольтных транзисторов [5]. Термин FACTS как синоним управляемой электропередачи стал использоваться в российской электроэнергетике с 1994–1996 гг., после публикации обзора состояния этой проблемы в энергосистемах Западной Европы, США и Канады [6].



Исследования по применению новейших типов компенсирующих и регулирующих устройств проводятся ведущими научно-исследовательскими и проектными организациями

В настоящее время термины гибкость и управляемость используются как синонимы и применяются в работах ведущих научно-исследовательских и проектных организаций России: ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС», ОАО «НТЦ ЕЭС», ОАО «Институт «Энергосеть-проект», ГУП «ВЭИ», – которые много лет вели и продолжают вести исследования по тематике управляемых электропередач с применением традиционных устройств регулирования [11–15], а теперь и с применением новейших типов компенсирующих и регулирующих устройств [16, 17].

Электропередачи с повышенной пропускной способностью, как управляемые, так и неуправляемые, должны быть способны загружаться до максимально допустимых по нагреву проводов токов при соблюдении нормативных запасов по устойчивости и при допускаемых уровнях напряжения по ВЛ. Иными словами, они должны обладать определенной гибкостью при ведении режима, что является очень важным и необходимым для построения адаптивных сетей переменного тока в ЕНЭС России. В большинстве своем подобная гибкость электропередачи может быть достигнута применением различных типов компенсирующих и регулирующих устройств, о которых ниже пойдет речь.

Но в некоторых случаях желаемые характеристики электропередачи могут быть получены без применения управляемых устройств. К ним можно отнести линии электропередачи:

- с последовательно включенной в середине ВЛ конденсаторной батареей с емкостным сопротивлением, равным 50% индуктивного сопротивления линии ( $X_c = 50\% X_L$ );
- с распределенной по длине ВЛ емкостной компенсацией (включение на ВЛ трех и более УПК

- на промежуточных подстанциях);
- полуволновые или настроенные на полуволну протяженные электропередачи;
- компактные ВЛ высокого и сверхвысокого напряжения и др.

Добавление к неуправляемым электропередачам управляемых устройств компенсации и регулирования позволит сделать электропередачу полностью управляемой, с высокой степенью адаптивности.

## НЕУПРАВЛЯЕМЫЕ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПОВЫШЕННОЙ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ

Обсудим неуправляемые электропередачи переменного тока на конкретных числовых примерах. Основные параметры ВЛ высокого и ультравысокого напряжения представлены в таблице 1.

$Z_c = \sqrt{x_0/b_0}$  – волновое сопротивление ВЛ;

$P_{нат} = U^2/Z_c$  – натуральная мощность ВЛ.

### А) ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧА 500 КВ С УПК 50% В СЕРЕДИНЕ ВЛ

На рис. 1 показана типичная схема электропередачи 500 кВ протяженностью 500 км с установкой продольной емкостной компенсации УПК 50% ( $X_c = 76,5 \text{ Ом} = \text{const}$ ).

Как известно, угловая характеристика радиальной электропередачи без потерь (рис. 1) записывается в виде:

$$P_n = \frac{U_1 U_4}{X_{14}} \sin \delta_{14}, \quad (1)$$

где  $U_1$  и  $U_4$  – напряжения шин системы (1 на рис. 1) и генератора (4 на рис. 1);  $X_{14}$  – взаимное реактивное сопротивление линии;  $\delta$  – угол между векторами напряжений  $\dot{U}_1$  и  $\dot{U}_4$ . Из (1) следует, что для компенсированной электропередачи ( $X_c$ ) характеристика  $P_n = f(\delta)$  (для  $X_{14} = X_L - X_c$ ) определяется следующим образом:

$$P_n = \frac{U_1 U_4}{X_L - X_c} \sin \delta_{14} \quad (2)$$

и при  $U_1 = U_4 = U$ :

$$P_n = \frac{U^2}{X_L - X_c} \sin \delta_{14}. \quad (3)$$

В таблице 2 приведены результаты расчетов установившихся режимов для электропередачи без УПК ( $X_c = 0$ ), представленной в виде индуктивной связи  $X_L = 153 \text{ Ом}$  при  $R_n = 0$  и  $b_n = 0$ , а в таблице 3 – с учетом УПК 50% ( $X_c = 76,5 \text{ Ом}$ ). Для различной передаваемой активной мощности по линии  $P_n = P_r$ : вариант 1 – для нулевой нагрузки по ВЛ  $P_n = 0$ ; вариант 2 – для нагрузки, равной натуральной мощности ВЛ,  $P_n = P_{нат} = 860 \text{ МВт}$  ( $I_n = 1,0 \text{ кА}$ ); вариант 3 – для нагрузки при максимально допустимом по нагреву токе ВЛ ( $I_n \leq 1,85 \text{ кА}$ ) при  $P_{нат} = 1395 \text{ МВт}$  и вариант 4 – для предельной по статической устойчивости  $P_{пред} = 1634 \text{ МВт}$ ,  $I_n = 2,67 \text{ кА}$  без УПК и  $P_{пред П} = 3268 \text{ МВт}$  ( $I_n = 5,34 \text{ кА}$ ) с УПК 50%. На рис. 2 показаны угловые характеристики ВЛ (вариант 1 – без УПК, вариант 2 – с УПК 50%).

Из таблицы 2, рис. 2 и 3 следует, что при отсутствии УПК (т.е.  $X_c = 0$ ) при допустимой максимальной токовой нагрузке линии ( $I_n = 1,85 \text{ кА}$ ,  $P_n = 1395 \text{ МВт}$ ) угол по ВЛ составляет  $\delta_{14} = 59^\circ$ , а запас статической устойчивости  $K_p = 1,17$  ниже допустимого нормативного ( $K_{доп} = 1,2$ ), напряжение в середине ВЛ снижается до 436 кВ и составляет 0,87 относи-

## СХЕМА ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ 500 КВ С ПРОДОЛЬНОЙ ЕМКОСТНОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ УПК 50% В СЕРЕДИНЕ ВЛ

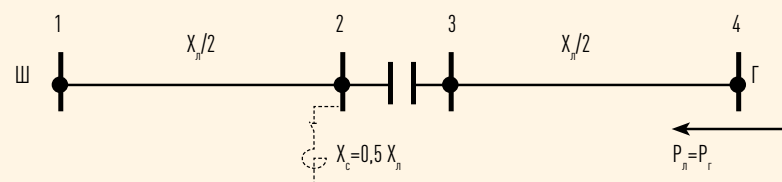


Рис. 1

тельной единицы (отн. ед.) от номинального.

Из таблицы 3 следует, что в случае 50% емкостной компенсации на всем диапазоне изменения передаваемой активной мощности  $P_n = 0 \div 3268$  МВт при поддержании номинального напряжения  $U_1 = U_4 = 500$  кВ на концах ВЛ, напряжение в середине ВЛ сохраняется неизменным, равным номинальному значению  $U_2 = U_3 = 500$  кВ. Данный эффект 50% емкостной компенсации электропередачи в середине ВЛ поясняется векторными диаграммами, показанными на рис. 3 (б).

В случае компенсированной ВЛ ( $X_c = 50\%$ ,  $X_n = 76,5$  Ом (таблица 3, рис. 3 (б))) при максимальной токовой нагрузке ВЛ поддерживается номинальное напряжение

по линии  $U_2 = U_3 = U$  и угол по передаче  $\delta_{14} = 28^\circ$ . Тем самым обеспечивается более чем двойной запас по статической устойчивости, что предопределяет также и хорошую динамическую устойчивость компенсированной электропередачи при больших возмущениях.

Если в середине ВЛ использовать большую, чем 50%, емкостную компенсацию, например 80%, то модули напряжений  $U_2$  и  $U_3$  превысят номинальные значения  $U_2 = U_3 > 533$  кВ (рис. 4). Если сместить место подключения УПК 50% от середины ВЛ, то изменятся также уровни напряжений в точках 2 и 3 (рис. 4). Смещение УПК на 100 км ближе к генератору (узел 4) приведет к увеличению модуля напряжения в узле 2 до 532 кВ и уменьшению в узле 3 до 485 кВ (рис. 5 (а)); при смеще-

нии УПК на 100 км ближе к шинам системы (узел 1) повышенное напряжение будет в узле 3 ( $U_3 > 532$  кВ) и пониженное – в узле 2 ( $U_2 < 485$  кВ (рис. 5 (б))). Все это необходимо учитывать при выборе как степени емкостной компенсации, так и места размещения УПК на ВЛ. Нужно, однако, иметь в виду, что указанные выше полезные свойства компенсированной ВЛ могут быть реализованы в полной мере только при размещении установки 50-процентной емкостной компенсации в середине ВЛ.

Так как реальная ВЛ не является идеальным индуктивным элементом, то всегда должны учитываться реальные потери ( $R_n$ ) и емкостная проводимость ( $b_n$ ) линии. В таблицах 4 и 5 приведены результаты расчетов установившихся режимов электропередачи 500 кВ длиной 500 км, с учетом активного сопротивления ВЛ ( $R_n = 14,4$  Ом) и емкостной проводимости на землю ( $b_n = 1794$  мкСм), для двух случаев: без УПК (таблица 4) и с УПК 50% ( $X_c = 76,5$  Ом (таблица 5)). Расчеты выполнены для трех характерных режимов: холостой ход ВЛ,  $P_n = 0$ ; передача натуральной мощности,  $P_{нат} = U^2/Z_c = 860$  МВт; передача мощности 1550 МВт при максимальном допустимом токе ВЛ 500 кВ не более  $I_n = 1,85$  кА.

Режим электропередачи 500 кВ без УПК при допустимой максимальной токовой нагрузке ( $I_n \geq 1,85$  кА

## ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ВЛ ВЫСОКОГО И УЛЬТРАВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

	Удельные параметры ВЛ			Вторичные параметры ВЛ	
	$X_0$ , Ом/км	$r_0$ , Ом/км	$b_0$ , мкСм/км	$Z_c$ , Ом	$P_{нат}$ , МВт
Класс ВЛ, кВ					
ВЛ 500	0,306	0,0288	$3,59 \cdot 10^{-6}$	292	860
ВЛ 1150	0,263	0,0135	$4,48 \cdot 10^{-6}$	243,1	5439

Таблица 1

## БЕЗ УПК ( $X_n = 153$ Ом, $R_n = 0$ , $b_n = 0$ )

	$P_n$ , МВт	1		2		4		$I_n$ , кА	Примечание
		$U_1$ , кВ	$\delta_1$	$U_2$ , кВ	$\delta_2$	$U_4$ , кВ	$\delta_4$		
1	0	500	0	500	0	500	0	0	Холостой ход
2	860	500	0	481	15,9	500	31,8	1,035	Натур. мощность
3	1395	500	0	436	29,3	500	58,6	1,85	Макс. ток ВЛ
4	1634	500	0	353,5	45	500	90	2,67	Предел

Таблица 2

(таблица 4)) характеризуется низкими уровнями напряжений по ВЛ и большими углами по электропередаче ( $\delta_{14} = 61,2$  эл. град.). Следует отметить, что поперечные емкости (межфазные емкости и емкости на землю) несколько изменяют режим и улучшают условия устойчивости (на 3–5% увеличивают значения характеристик 1 и 2 на рис. 2).

В случае компенсированной электропередачи ( $X_c = 76,5$  Ом = 50%  $X_n$ ) и для  $R_n = 14,4$  Ом и  $b_n = 1794$  мкСм, как это видно из таблицы 5, отрабатываются малые углы по электропередаче (при  $I_n = 1,85$  кА,  $\delta_{14} = 29,8^\circ$ ). Однако при этом возникают значительные скачки напряжений по концам УПК ( $U_2$  и  $U_3$ ). Причем напряжения в узле 3 превышают наибольшее рабочее ( $U_{нр}$ ) значение, равное 525 кВ. Эти скачки объясняются тем, что напряжение на емкостном сопротивлении ( $X_c \cdot I_n$ )

компенсирует только индуктивную составляющую падения напряжения вдоль линии ( $X_n \cdot I_n$ ). При этом остается нескомпенсированной ортогональная составляющая падения напряжения на активном сопротивлении половины длины линии  $R_n / 2 \cdot I_n$ . Ослабить этот скачок можно путем изменения фазы тока ВЛ через  $X_c$ , что можно сделать за счет включения дополнительного шунтирующего реактора в узле с пониженным напряжением. В этом случае при передаче мощности от генератора (4) к шинам (1) напряжение оказывается пониженным в узле 2, куда и подключается этот ШР (рис. 1, пунктир). Результаты расчета приведены в таблице 6: УПК 50% в середине ВЛ (узлы 2–3), ШР 180 ( $b_{ШР} = 653$  мкСм) в узле 2, а поясняющие векторные диаграммы напряжений при максимальном токе ВЛ ( $I_n = 1,85$  кА) показаны на рис. 6 и 7.

Показанная на рис. 6 диаграмма соответствует данным таблицы 5 (строка 3) для  $|U_2| = 493$  кВ  $< U_{ном}$  и  $|U_3| = 537$  кВ  $> U_{нр}$ . Диаграмма на рис. 7 соответствует таблице 6 (строка 3), когда при включении ШР 180 в узле 2 напряжение в нем сохраняется неизменным и равным  $|U_2| = 493$  кВ, а напряжение в узле 3 снижается до значения  $|U_3| = 514$  кВ  $< 525$  кВ.

То есть во всем рабочем диапазоне передачи активной мощности ( $P_n = 0 \div 1600$  МВт), от шин генератора (узел 4) до шин системы (узел 1), для нормализации напряжения в середине ВЛ на шинах УПК необходимо использовать ШР 180 Мвар в узле 2. При изменении направления передачи мощности ШР 180 Мвар должен быть подключен в узле 3. Альтернативный способ уменьшения скачков напряжения состоит в размещении УПК на нескольких промежуточных подстанциях ВЛ.

## УПК 50% (76,5 Ом) В СЕРЕДИНЕ ВЛ ( $X_n = 153$ Ом, $R_n = 0$ , $b_n = 0$ )

	$P_n$ , МВт	$U_1$ , кВ	$\delta_1$ , град.	$U_2$ , кВ	$\delta_2$ , град.	$U_3$ , кВ	$\delta_3$ , град.	$U_4$ , кВ	$\delta_4$ , град.	$I_n$ , кА	Примечание
1	0	500	0	500	0	500	0	500	0	0	Холостой ход
2	860	500	0	500	15,3	500	0	500	15,3	1,0	Натур. мощность
3	1550	500	0	500	28,3	500	0	500	28,3	1,85	Макс. ток ВЛ
4	3268	500	0	500	90	500	0	500	90	5,34	Предел

Таблица 3

### УГЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ:

1 – БЕЗ УПК; 2 –  $X_c = 50\%$

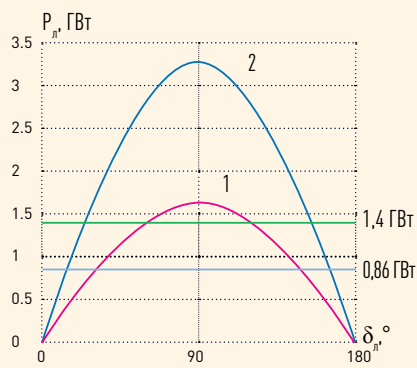


Рис. 2

### Б) ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧА С РАВНОМЕРНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ЕМКОСТНОЙ КОМПЕНСАЦИИ ВДОЛЬ ВЛ

В качестве примера рассмотрим ту же линию электропередачи 500 кВ длиной 500 км с общей 50-процентной емкостной компенсацией, размещенной на трех промежуточных подстанциях (рис. 8).

Здесь линия 500 кВ представлена четырьмя участками по 125 км каждый с тремя УПК по 16,7% ( $X_c = 25,5 \text{ Ом}$ ) в узлах 2–3, 4–5 и 6–7. Результаты расчетов установившихся режимов реальной ВЛ 500 кВ ( $X_l = 153 \text{ Ом}$ ,  $R_l = 14,4 \text{ Ом}$  и  $b_l = 1794 \text{ мкСм}$ ) для четырех режимных

### ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ НАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ ВЛ 500 КВ: (А) БЕЗ УПК; (Б) С УПК 50% В СЕРЕДИНЕ ВЛ ДЛЯ МАКСИМАЛЬНЫХ ПО ТОКУ РЕЖИМОВ:

Для  $P_{\text{пред}} = 3268 \text{ МВт}$  и  $I_l = 5,34 \text{ кА}$  (ПОЗИЦИЯ 3);  $P_l = 1550 \text{ МВт}$  и  $I_l = 1,85 \text{ кА}$  (ПОЗИЦИЯ 4)

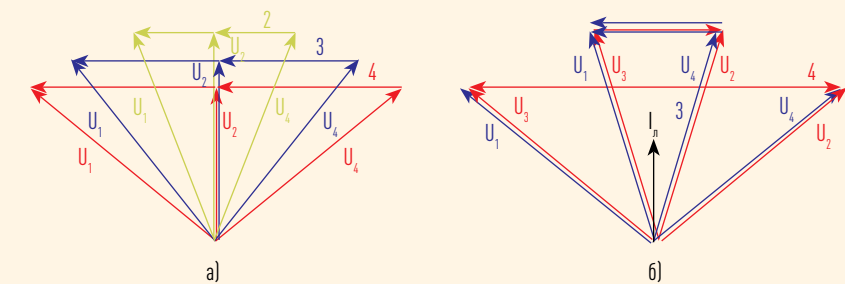


Рис. 3

ситуаций ( $P_r = 0,860$ ; 1600 и  $P_{\text{пред}}$ ) приведены в таблице 7.

В отличие от предыдущего примера (УПК 50% в середине ВЛ) здесь отсутствуют большие скачки напряжений на емкостных сопротивлениях. В этом случае напряжения по ВЛ не выходят за пределы 485–515 кВ, поэтому для ведения режима не требуется каких-либо дополнительных устройств компенсации при изменении передаваемой мощности по ВЛ от 0 до 1600 МВт. Таким образом, рассматриваемая линия электропередачи с тремя равномерно размещенными по ВЛ УПК по 16,7% является достаточно гибкой в части ведения режима.

### В) ПОЛУВОЛНОВАЯ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧА

Свойства полуволновой ВЛ (или настроенной на полуволну) переменного тока частотой 50 Гц и длиной около 3000 км известны и хорошо изучены [9, 10]. Самыми полезными свойствами таких линий являются нулевое входное реактивное сопротивление  $X_{\text{вл}} \approx 0$ ,  $Z_{\text{вх}} \approx R_{\Sigma \text{вл}}$  и низкие уровни напряжения по ВЛ (рис. 9, таблица 8) при передаче по ней активных мощностей не более  $1,05-1,1 P_{\text{нат}}$ .

В таблице 8 и на рис. 9 на примере ВЛ 500 кВ и  $l > 3000 \text{ км}$  показаны четыре реальные ситуации: вариант 1 – передача нулевой активной

### ВЕКТОРНАЯ ДИАГРАММА НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ $X_c = 80\%$ , $I_l = 1,85 \text{ кА}$

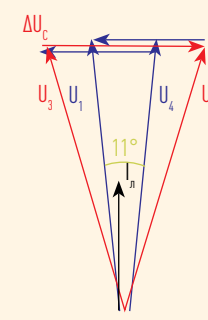


Рис. 4

мощности,  $P_l = 0$ ; вариант 2 – передача половины натуральной мощности,  $P = 0,5 P_{\text{нат}}$ ; вариант 3 – передача натуральной мощности,  $P_l = P_{\text{нат}} = 860 \text{ МВт}$  и вариант 4 – передача  $P_l = 1,1 P_{\text{нат}} \approx 1000 \text{ МВт}$ , когда напряжение в середине ВЛ уже превышает допустимое значение  $1,1 U_{\text{ном}} = 550 \text{ кВ}$ .

Ясно, что чем выше класс напряжения линии, тем больше эффективность такой электропередачи. Например, для ВЛ 1150 кВ при  $Z_c = 243 \text{ Ом}$ ,  $P_{\text{нат}} 1150 = 5439 \text{ МВт}$  передаваемая мощность может составить 5500–6000 МВт. Огромные просторы нашей страны и значительные удаленности между генерирующими

### ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ $X_c = 50\%$ И СМЕЩЕНИИ УПК ПО ВЛ:

А) БЛИЖЕ К ГЕНЕРАТОРУ; Б) БЛИЖЕ К ШИНАМ  $I_l = 1,85 \text{ кА}$

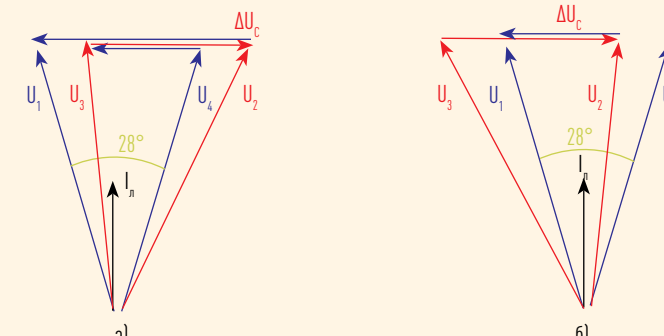


Рис. 5

источниками и крупными потребителями позволяют реально применять полуволновые линии  $\geq 3000 \text{ км}$  (или настроенные на полуволну) для передачи активной мощности на большие расстояния. Имеющиеся данные натурного эксперимента ВЛ 500 кВ Волжская ГЭС – Москва [10], выполненного еще в начале 1960-х гг., показали реальность создания настроенной на полуволну электропередачи. При этом надо четко понимать, что такая электропередача не может иметь промежуточных отборов. И очень может быть, стоит вернуться к вопросу о создании полуволновой ВЛ на базе еще не демонтированной ВЛ 1150 кВ Сибирь – Урал. С этим пред-

ложением неоднократно выходили наши коллеги из ОАО «СибНИИЭ». По своим свойствам такая ВЛ при передаче мощности в диапазоне  $P_l = 0 \div 1,1 P_{\text{нат}}$  будет достаточно гибкой электропередачей без применения управляемых устройств.

### УПРАВЛЯЕМЫЕ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Для анализа свойств управляемых линий электропередачи переменного тока воспользуемся классической формулой угло-

### БЕЗ УПК ( $X_l = 153 \text{ Ом}$ , $R_l = 14,4 \text{ Ом}$ , $b_l = 1794 \text{ мкСм}$ )

Схема ВЛ	№ п/п	$P_r$ , МВт	1		3		4		$I_l$ , кА	Примечание
			$U_1$ , кВ	$\delta_1$ , °	$U_3$ , кВ	$\delta_3$ , °	$U_4$ , кВ	$\delta_4$ , °		
Без УПК	1	0	500	0	517,7	0	500	0	0,26	Холостой ход
	2	860	500	0	500	14,8	500	30,0	1,0	Натур. мощн.
	3	1550	500	0	446	30,4	500	61,2	1,85	Макс. ток ВЛ

Таблица 4

### УПК 50% ( $X_l = 153 \text{ Ом}$ , $R_l = 14,4 \text{ Ом}$ , $b_l = 1794 \text{ мкСм}$ )

Схема ВЛ	№ п/п	$P_r$ , МВт	1		2		3		4		$I_l$ , кА	Примечание
			$U_1$ , кВ	$\delta_1$ , °	$U_2$ , кВ	$\delta_2$ , °	$U_3$ , кВ	$\delta_3$ , °	$U_4$ , кВ	$\delta_4$ , °		
УПК 50%	1	0	500	0	517,7	0	517,7	0	500	0	0,26	Холостой ход
	2	860	500	0	505	14,6	528,5	0,7	500	15,4	0,96	Натур. мощн.
	3	1650	500	0	492,6	28,8	536,6	1,8	500	29,8	1,85	Макс. ток ВЛ

Таблица 5



### ВЕКТОРНАЯ ДИАГРАММА НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ МАКСИМАЛЬНОМ ТОКЕ ВЛ

( $I_n = 1,85$  КА) ДЛЯ  $|\dot{U}_2| = 493$  КВ  $< U_{НОМ}$   
И  $|\dot{U}_3| = 537$  КВ  $> U_{НР}$

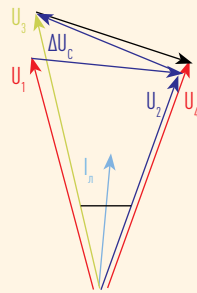


Рис. 6

вой характеристики простейшей электропередачи «генератор – линия – шины» (см. выражение 1) и векторными диаграммами токов и напряжений (рис. 3 [а]). Отметим, что  $U_1$  и  $U_4$  могут меняться в определенном (но не очень широком) диапазоне ( $\pm 5\%$ ) за счет действия регуляторов возбуждения примыкающих генераторов. Угол  $\delta_{14}$  может варьироваться с помощью фазоповоротного устройства (ФПУ), а взаимное сопротивление  $X_{14}$  может меняться не только за счет изменения конструкции линии, числа

### ВЕКТОРНАЯ ДИАГРАММА НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ МАКСИМАЛЬНОМ ТОКЕ ВЛ, ШР В УЗЛЕ 2

( $I_n = 1,85$  КА) ДЛЯ  $|\dot{U}_2| = 493$  КВ  
И  $|\dot{U}_3| = 514$  КВ  $< 525$  КВ

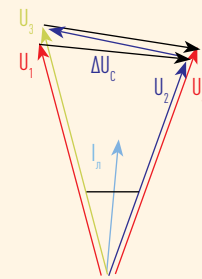


Рис. 7

параллельных ветвей, но и опосредованно, при последовательно включенных в линию конденсаторах (т. е. емкостных сопротивлений  $X_c$ ), когда  $X_{14} = X_l - X_c$ .

В формуле (1) не отражаются напряженные элементы управляемой поперечной компенсации (проводимость СТК, синхронные компенсаторы и СТАТКОМ), а также элементы продольной компенсации (управляемая ЭДС), установленные в середине ВЛ. Формулы для расчета угловых характеристик ВЛ с указанными

устройствами в середине ВЛ приводятся ниже. При выводе этих формул используются общее выражение для передаваемой мощности  $P_n = UI \cos \varphi = UI \cos \delta / 2$ , векторные диаграммы и метод контурных токов.

В качестве примеров рассмотрим четыре возможных типа управляемых электропередач, соответствующей простейшей схеме «генератор – линия – шины», с управляемым компенсирующим или регулирующим устройством в середине ВЛ 500 кВ длиной 730 км ( $X_l = 223$  Ом = 0,765 отн. ед.). В качестве базисных величин используются  $P_{нат} = 860$  МВт и  $Z_c = 292$  Ом.

а). В случае применения управляемой поперечной компенсации КРМ (КС, СТК, СТАТКОМ и др.) при напряжениях на концах  $U_1 = U_4$  и в середине ВЛ  $U_3 = U_{НОМ} = 500$  кВ характеристика электропередачи определяется выражением (рис. 10 кривая 2):

$$P_n = \frac{2U^2}{X_l} \cdot \sin \frac{\delta_n}{2} \quad (4)$$

Предел передаваемой активной мощности всей электропередачи удваивается и будет определяться пропускной способностью участка половинной длины  $X_{14} = X_l / 2$ , достигая своего максимального значения 2242 МВт при  $\delta = 180^\circ$ . Максималь-

### УПК 50% ( $X_c = 76,5$ Ом), ШР 180 В УЗЛЕ 2 ( $X_l = 153$ Ом, $R_l = 14,4$ Ом, $b_l = 1794$ МКСМ)

№ п/п	$P_n$ , МВт	1		2		3		4		$I_n$ , кА	Примечание
		$U_1$ , кВ	$\delta_1$ , °	$U_2$ , кВ	$\delta_2$ , °	$U_3$ , кВ	$\delta_3$ , °	$U_4$ , кВ	$\delta_4$ , °		
1	0	500	0	516,9	0	492	0	500	0	0,26	Холостой ход
2	860	500	0	504,3	14,6	504,1	0	500	15,1	0,97	$P_{нат}$
3	1600	500	0	492,6	27,9	514,1	0,5	500	28,6	1,81	$I_{л, макс}$

Таблица 6

### СХЕМА ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ 500 КВ С СУММАРНОЙ 50%-НОЙ ЕМКОСТНОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ, РАЗМЕЩЕННОЙ НА ТРЕХ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ПОДСТАНЦИЯХ

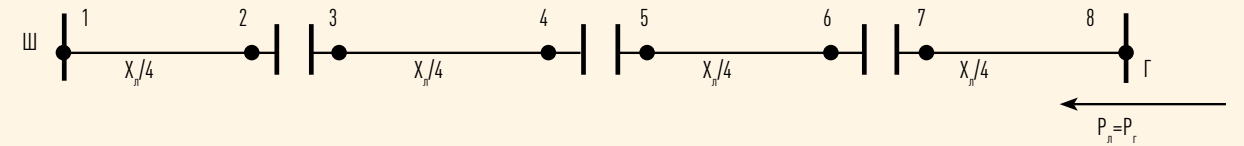


Рис. 8

ная реактивная мощность компенсаторов при этом определяется по формуле:

$$Q_{max} = -\frac{4}{X_l} \quad (5)$$

и составит ~ 4497 Мвар независимо от типа компенсирующего устройства.

Отношение максимальной мощности компенсирующих устройств к пределу передаваемой мощности для простейшей схемы электропередачи постоянно и составляет:  $Q_{max} / P_{пред} \approx 2$ .

В случае компенсатора ограниченной реактивной мощности, например СТК,  $Q_{СТК} < Q_{max}$ , угловая характеристика электропередачи определяется выражением:

$$P_n = \frac{U^2}{X_l (1 + \frac{X_l}{4X_{СТК}})} \cdot \sin \delta \quad (6)$$

где реактивное сопротивление СТК вычисляется по формуле:

$$X_{СТК} = \frac{U^2}{Q_{СТК}} \quad (7)$$

На рис. 10 (кривая 3) показана характеристика для случая СТК с мощностью генерации 360 Мвар. При использовании в середине ВЛ синхронных или асинхронизированных компенсаторов реактивной мощности КС или АСК (КСП) такой же установленной мощности, как и СТК, угловая характеристика электропередачи

будет несколько выше кривой 3 за счет допускаемой длительной перегрузки указанных вращающихся машин.

Все компенсаторы должны быть реверсивными  $\pm 360$  Мвар, чтобы также обеспечить допустимый уровень напряжения в узле 3 при передаче по ВЛ нулевой активной мощности.

б). В случае применения УПК ( $X_c = \text{var}$ ) угловая характеристика электропередачи при  $U_1 = U_2 = U$  рассчитывается по формуле:

$$P_n = \frac{U^2}{X_l - X_c} \cdot \sin \delta_n \quad (8)$$

где  $X_c$  – изменяемая (регулируемая) величина.

На рис. 11 показаны характеристики

### 3хУПК 16,7% (3x25,5 Ом) ВЛ 500 КВ 500 КМ ( $X_l = 153$ Ом, $R_l = 14,4$ Ом, $b_l = 1794$ МКСМ)

№ п/п	$P_n$ , МВт	1	2	3	4	5	6	7	8	$I_n$ , кА	Примечания
		$U_1$ , кВ	$U_2$ , кВ	$U_3$ , кВ	$U_4$ , кВ	$U_5$ , кВ	$U_6$ , кВ	$U_7$ , кВ	$U_8$ , кВ		
1	0	500	513	507	512	512	507	513	500	0,26	Холостой ход
2	860	500	503	507	504	512	503	515	500	1,0	$P_{нат}$
3	1600	500	487	502	490	505	495	509	500	1,83	$I_{л, макс}$

Таблица 7

## НАПРЯЖЕНИЯ НА ПОЛУВОЛНОВОЙ ВЛ 500 КВ ДЛИНОЙ 3000 КМ

- 1)  $P_{л} = 0$ ;
- 2)  $P = 0,5 P_{НАТ}$ ;
- 3)  $P_{л} = P_{НАТ} = 860$  МВт;
- 4)  $P_{л} = 1,1 P_{НАТ} \approx 1000$  МВт

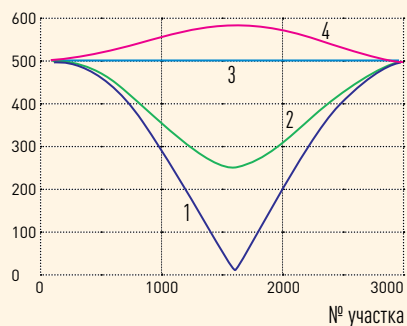


Рис. 9

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЛ С ПОПЕРЕЧНОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ КРМ

(здесь 1 о. е. =  $P_{НАТ} = 860$  МВт)

- 1) БЕЗ КУ; 2)  $U_1 = U_2$  и  $U_3 = U_{НОМ} = 500$  кВ;
- 3) ПРИ ОГРАНИЧЕННОЙ МОЩНОСТИ КРМ;
- 4) ПЕРЕДАВАЕМАЯ МОЩНОСТЬ ПО ВЛ

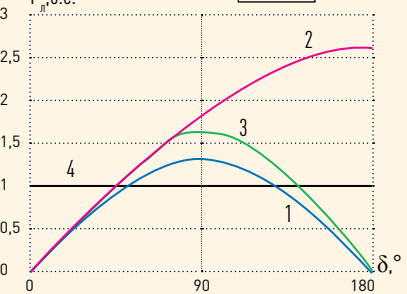
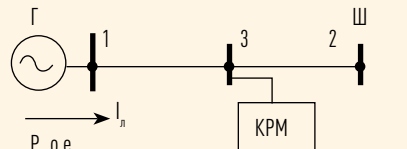


Рис. 10

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЛ С УПРАВЛЯЕМОЙ ПРОДОЛЬНОЙ ЕМКОСТЬЮ

- 1)  $X_c = 0$ ; 2)  $X_c = 0,25 X_{л}$ ; 3)  $X_c = 0,5 X_{л}$

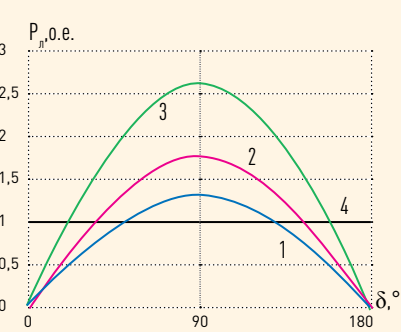
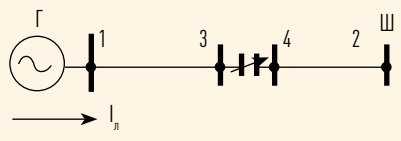


Рис. 11

ВЛ при  $X_c = 0$  (1),  $X_c = 0,25 X_{л}$  (2) и  $X_c = 0,5 X_{л}$  (3).

При максимально допустимом (1,85 кА) токе ВЛ мощность емкостной компенсации составит, соответственно, при 25%  $Q_{УПК} = 565$  Мвар, при 50%  $Q_{УПК} = 1130$  Мвар.

в). В случае применения управляемого источника напряжения (УИН), включенного последовательно в линию, характеристика мощности электропередачи при  $U_1 = U_4 = U$  рассчитывается по формуле:

$$P_{л} = \frac{U}{X_{л}} \cdot (U \cdot \sin \delta_{л} - E \cdot \cos \frac{\delta}{2}), \quad (9)$$

где  $E$  – изменяемая (регулируемая) величина ЭДС.

На рис. 12 приведены характеристики электропередачи: при  $E=0$  (кривая 1), при  $E = -0,5 = \text{const}$  (емкостный режим) (2) и при  $E = 0,5 = \text{const}$  (индуктивный режим) (3). Мощность устройства при максимально

допустимом токе ВЛ (1,85 кА) в емкостном режиме составляет при  $E = -0,5 U_{ФН} = 144,5$  кВ  $Q_{УИН} = 802$  Мвар.

г). Если в начале ВЛ будет подключено фазоворотное устройство (ФПУ), то угловая характеристика электропередачи при  $U_1 = U_4 = U$  рассчитывается по формуле:

$$P_{л} = \frac{U^2}{X_{л}} \cdot \sin (\delta \pm \varphi), \quad (10)$$

где  $\varphi$  – угол поворота вектора напряжения на выходе ФПУ.

На рис. 13 показаны характеристики электропередачи для трех углов поворота: 1 –  $\varphi_0 = 0^\circ$ , 2 –  $\varphi_1 = 30^\circ$ , 3 –  $\varphi_3 = -30^\circ$ , 4 – передаваемая по ВЛ натуральная мощность. Это вполне реальный и часто встречающийся за рубежом диапазон изменения фазы вектора напряжения.

д). В качестве управляемого регулирующего устройства на электропередаче переменного тока может

использоваться вставка постоянного тока на основе преобразователей напряжения ПН1 и ПН2. Возможны два варианта использования ВПТН:

- связь двух энергосистем с неравными частотами  $f_1 \neq f_2$ ;
- включение ВПТН в ветвях одной системы для ограничения токов в этих ветвях как в установившихся, так и в переходных режимах.

Активная мощность вставки постоянного тока  $\pm P_{ВПТН}$  выбирается исходя из максимально допустимого тока в соединяемых ветвях, а реактивная мощность – из условий работы прилегающих сетей, но в пределах  $Q_{ВПТН} = \pm 0,6 P_{ВПТН}$  [Мвар] со стороны инвертора и выпрямителя. Из рассмотренных примеров можно сделать следующие выводы:

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЛ С УПРАВЛЯЕМОМ ИСТОЧНИКОМ НАПРЯЖЕНИЯ

- 1)  $E = 0$ ; 2)  $E = -0,5 = \text{CONST}$  (ЕМКОСТНЫЙ РЕЖИМ); 3)  $E = 0,5 = \text{CONST}$  (ИНДУКТИВНЫЙ РЕЖИМ)

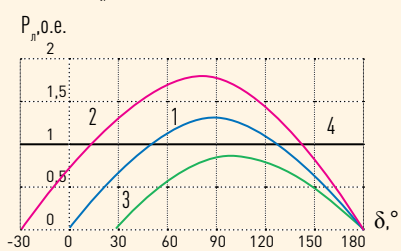
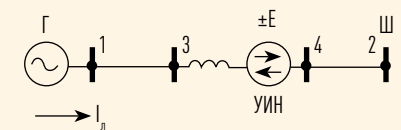


Рис. 12

- наибольшее повышение пропускной способности ВЛ можно получить при применении управляемой продольно-емкостной компенсации с использованием регулируемых конденсаторных батарей (рис. 11) и управляемого источника напряжения на основе СТАТКОМа (рис. 12); добавление в этих схемах устройств поперечной компенсации, особенно реализация схемы объединенного регулятора перетока мощности ОРПМ [16, 17], позволит сделать электропередачу полностью управляемой; устройства поперечной компенсации (при достаточной установленной мощности) позволяют регулировать напряжение как в части поддержания требуемого уровня на-

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЛ С УПРАВЛЯЕМОМ ФПУ

- 1)  $\varphi_0 = 0^\circ$ ; 2)  $\varphi_1 = 30^\circ$ ;
- 3)  $\varphi_3 = -30^\circ$ ; 4) ПЕРЕДАВАЕМАЯ МОЩНОСТЬ ПО ВЛ

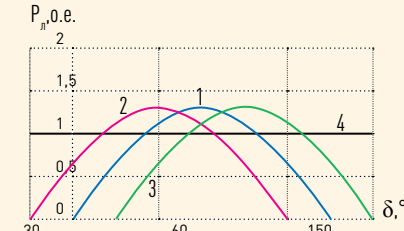
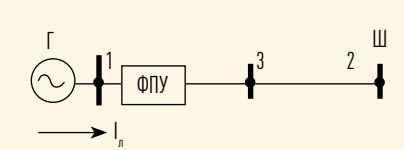


Рис. 13

- ряжения, так и для стабилизации напряжения в переходных режимах, а добавление управляемых последовательных конденсаторных батарей позволяет повысить пропускную способность электропередачи; фазоворотные устройства (в сочетании с устройствами поперечной компенсации) обеспечивают поддержание напряжения по ВЛ и повышают пропускную способность электропередачи. При достаточном быстродействии таких устройств (ФПУ и КРМ) достигается эффективное демпфирование электро-механических колебаний.
- Кроме того, следует отметить высокую эффективность применения вставок постоянного тока на базе

преобразователей напряжения (ВПТН) как основного элемента управляемой электропередачи для объединения на параллельную работу несинхронно работающих энергосистем, а также применения ВПТН на отдельных ветвях энергосистемы для ограничения токов в установившихся режимах и при динамических возмущениях. Совместное применение ВПТН и КРМ позволяет сделать электропередачу управляемой по току и напряжению и существенно повысить надежность работы объединенных энергосистем.

## ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ УПРАВЛЯЕМЫХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ В ЭЭС РОССИИ

Проведенные в ОАО «Энергосеть-проект» в 2009–2010 гг. исследования по оценке целесообразности применения устройств FACTS для повышения пропускной способности электрических сетей в семи ОЭС России (Востока, Сибири, Урала, Средней Волги, Центра, Северо-Запада, Юга), а затем исследования, выполненные в ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС», ОАО «Сибирский ЭНТЦ» и ОАО «Дальэнергосетьпроект» для тех же энергосистем, по расстановке СКРМ и РН для нормализации напряжений и перетоков реактивной мощности в сетях 220–500 кВ позволяют составить перечень первоочередных узлов для установки как традиционных компенсирующих и регулирующих устройств, так и с использованием новейших технологий на основе преобразователей напряжения. Обсуждение этих исследований выходит за рамки данной статьи. Но часть объектов, рассматриваемых с позиций гибких неуправляемых и управляемых свя-

## НАПРЯЖЕНИЯ НА ПОЛУВОЛНОВОЙ ВЛ

№ п/п	$P_{л'}$ , МВт	$U_1$	$U_4$	$U_7$	$U_{10}$	$U_{13}$	$U_{16}$	$U_{19}$	$U_{22}$	$U_{25}$	$U_{28}$	$U_{31}$	Примечание
1	0	500	476	406	296	156	0	156	296	406	476	500	Холостой ход
2	428	500	482	431	358	285	251	285	358	431	482	500	0,5 $P_{нат}$
3	856	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	$P_{нат}$
4	1000	500	509	531	557	577	584	577	557	531	509	500	1,15 $P_{нат}$

Таблица 8

зей, могут быть здесь представлены. Как следует из этих исследований, практический интерес в качестве гибких связей могут представлять следующие объекты в ЕНЭС России:

- связь 500 кВ Урал – Средняя Волга – Центр с компенсаторами реактивной мощности на ПС 500 «Златоуст» (200), «Бекетово» (200), «Вятка» (200) и нерегулируемыми УПК 30–50% на участках ВЛ 500 «Бекетово» – «Бугульма» (390 МВА), Воткинская ГЭС – «Вятка» (320 МВА), «Вятка» – «Звезда» (170 МВА). Использование этих связей позволит увеличить пропускную способность сечения на 300–400 МВт в оба направления передачи мощности;
- электропередача 500 кВ Саяно-Шушенская ГЭС – «Новокузнецкая», «Кузбасская» с управляемыми УПК (20% УУПК + 30% НУПК) на ПС 500 кВ «Шерегеш» («Таштагол») (УУПК 2\*270 и НУПК 2\*410 Мвар) для повышения пропускной способности связи на 600–700 МВт и увеличения выдачи мощности СШ ГЭС на ту же величину;

– электропередача 220 кВ Сибирь – Восток (ВЛ 220 кВ «Холбон» – «Жирекен» – «Могоча» – «Ер. Павлович» – «Сковородино») с вставкой постоянного тока (ВПТН) на ПС 220 кВ «Могоча» ( $\pm 200$  МВт,  $\pm 120$  Мвар) и компенсаторами реактивной мощности на ПС 220 кВ «Холбон» (–80, +100) и ПС 220 кВ «Сковородино» ( $\pm 100$  Мвар) для создания взаимобмена мощностями в ремонтных и послеаварийных режимах и обеспечения надежного питания железнодорожных магистралей;

– электропередача 220 кВ Сибирь – Восток (северный транзит) (ВЛ 220 кВ «Таксимо» – «Чара» – «Хани» – «Тында» – «Сковородино») с ВПТН  $\pm 100$  МВт  $\pm 60$  Мвар на ПС 220 кВ «Чара» («Хани») и компенсаторами реактивной мощности на ПС 220 кВ «Таксимо» ( $\pm 100$  Мвар) и ПС 220 кВ «Сковородино» (см. предыдущее) для обеспечения надежного питания насосных станций нефтепровода Восточная Сибирь – Тихий океан, ж/д магистра-

лей и возможного обмена мощностями между системами при ремонтных и послеаварийных режимах. В 2006 г. был предложен алгоритм управления ВПТН с управлением турбинами Мамаканской ГЭС и Нерюнгринской ГРЭС; электропередача 220 кВ «Нижевартовская» – «С. Соснинская» – «Чапаевка» – «Парабель» – «Володино» – «Томская» с ВПТН  $\pm (250 \div 450)$  МВт и  $\pm (130 \div 270)$  Мвар на ПС 220 кВ «С. Соснинская» для ограничений тока по этой связи и обеспечения возможности устойчивой работы прилегающих к указанной электропередаче 220 кВ газотурбинных и других небольших тепловых электростанций (пока нет четкого технико-экономического обоснования такой вставки). Одновременно с решением вопроса о сооружении ВПТН на ВЛ 220 кВ «Нижевартовская» – «С. Соснинская» – «Томская» должны быть решены вопросы с выбором мощностей и типа КРМ на ПС 220 кВ «Чапаевка» и ПС 500/220 кВ «Парабель».

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Термин FACTS – управляемые электропередачи переменного тока – должен использоваться как обобщающий термин, подчеркивающий повышенную пропускную способность электропередачи при поддержании параметров режима (тока, напряжения, угла) в пределах допустимых значений на всем обозначенном диапазоне изменения передаваемой мощности и нормируемые показатели устойчивости при малых и больших возмущениях. Этот термин не означает исключительность применения регулирующих и компенсирующих устройств на базе новейшей силовой электроники. Должны быть объединены все быстродействующие устройства.

2. Управляемыми электропередачами могут быть некоторые линии высокого, сверхвысокого и ультравысокого напряжения без использования управляемых устройств компенсации: ВЛ 500 кВ и выше с УПК 50% в середине ВЛ или продольной емкостной компенсацией 50–75%, равномерно размещенной по длине ВЛ на нескольких промежуточных подстанциях; ВЛ 750–1150 кВ полуволновые (3000 км) или настроенные на полуволну без промежуточных отборов и некоторые компактные линии электропередачи напряжением 220 кВ и выше с необходимой настройкой и доведением неуправляемых реакторов.

3. Важными регулирующими элементами управляемых электропередач могут быть вставки постоянного тока (возможно, и линии постоянного тока) в сочетании с устройствами поперечной компенсации, связывающие несинхронно работающие энергосистемы, а также при использовании ВПТН на отдельных ветвях внутри энергосистемы для ограничения тока в установившихся режимах и снижения уровней токов КЗ.

4. Управляемые электропередачи переменного тока следует рассматривать как важный и основной элемент

адаптивных сетей в ЕНЭС России. К сожалению, работы по созданию ГЭПТ как элемента адаптивной сети находятся в начальной стадии, хотя выполнены объемные исследования по применению ГЭПТ в ЕНЭС России, намечены места размещения регулирующих и компенсирующих устройств, начато проектирование отдельных объектов.

## ЛИТЕРАТУРА

- Sumi Y., Harumoto Y., Hasegawa T., Yano M., Ikeda K., Matsuiri T. New Stadic var control using Force Commutated Inverters // Trans. on PAS, Vol. PAS-100, № 9, 1981, pp. 4216–4224.
- Addresses flexible AC transmission // The EPRI Journal for April-May 1986.
- Gyugyi L. Power electronics in electric utilities: Static VAR compensator // Proc. of the IEEE, Vol. 76, № 4, 1988.
- Hingorani N. G. High power electronic and flexible AC transmission systems // IEEE Power Engineering Review, 1988 July.
- Gyngyi L. et al. The unified power flow controller: a new approach to power transmission control // IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 10, № 2, 1995.
- Ивакин В. Н., Ковалев В. Д., Худяков В. В. Гибкие электропередачи переменного тока // Электротехника, 1996, № 8.
- Жданов П. С. Вопросы устойчивости электрических систем. – М.: Энергия, 1979.
- Веников В. А. Дальние электропередачи. – М.-Л.: ГЭИ, 1960. – 312 с.
- Щербаков В. К., Лукашов Э. С., Ольшевский О. В., Путилов А. Т. Настроенные электропередачи. – Новосибирск, 1963.
- Вершков В. К., Нахапетян К. Т., Ольшевский О. В., Совалов С. А., Фотин В. П., Щербаков В. К. Комплексные испытания полуволновой электропередачи в сети 500 кВ в ЕЭС европейской части СССР // Электричество, 1968, № 8.
- Шакарян Ю. Г. Исследование режимов работы управляемой машины

## ИНФОРМАЦИЯ

## FACTS

FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems) – комплекс технических и информационных средств автоматического управления параметрами линий электропередачи.

переменного тока в электрических системах. – Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. – М.: ЭНИН им. Г. М. Кржижановского, 1974.

12. Постолатий В. М. Технические характеристики управляемых самокомпенсирующихся линий электропередачи и целесообразность применения их для формирования системообразующей сети ЕЭС СССР // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1989, № 1. – С. 54–65.

13. Крюков А. А., Либкинд М. С., Сорокин В. М. Управляемая поперечная компенсация электропередачи переменного тока / Под ред. М. С. Либкинда. – М.: Энергоиздат, 1981. – 184 с.

14. Азарьева Е. Д. Повышение пропускной способности электропередачи 1150 кВ переменного тока при помощи источников реактивной мощности // Электрические станции, 1984, № 9. – С. 41–44.

15. Фокин В. К. Повышение устойчивости электропередач и узлов нагрузки путем регулирования возбуждения синхронных машин по двум осям. – Диссертация на соискание ученой степени к. т. н. – М.: ВНИИЭ, 1980.

16. Кочкин В. И., Нечаев О. П. Применение статических компенсаторов реактивной мощности в электрических сетях энергосистем и предприятий. – М.: ЭНАС, 2000.

17. Кочкин В. И., Шакарян Ю. Г. Применение гибких (управляемых) систем электропередачи переменного тока в энергосистемах. – М.: Торус-Пресс, 2011. – 312 с., ил.