

им были изложены в докладе (опубликован в 1919 г.) «О границах применения переменных токов для передачи энергии на большие расстояния». Переменный ток из-за влияния емкости и самоиндукции воздушной линии электропередачи и резко возрастающих потерь экономически не целесообразно передавать на расстояния свыше 500 км и нужно переходить на воздушные линии постоянного тока; для подземных кабельных сетей границы применимости переменного тока при этом еще более узки. Будущее развитие электроэнергетики ученый видел в дальних электропередачах постоянного тока напряжением в миллионы вольт по подземным кабелям. Как можно будет получать постоянный ток сверхвысоких напряжений, он не знал, но был уверен, что такой способ будет найден. В нашей стране первая мощная линия электропередачи постоянного тока напряжением 800 кВ длиной 473 км Волжская ГЭС–Донбасс была введена в действие в 1966 г. В 80-х годах 20 в. линии электропередачи от электростанций на сверхдальние расстояния (1500 км) были выполнены на постоянном токе напряжением 1500 кВ.

После окончания войны в 1918 г. Доливо-Добровольский вернулся на фирму AEG, но болезнь сердца, преследовавшая его с детских лет, обострилась, и 15 ноября 1919 г. в возрасте 56 лет он скон-

чался. Похоронен в г. Гейдельберге (округ в составе земли Бавария в Германии).

Полученные более 100 лет назад результаты научных работ гениального русского ученого и изобретателя М.О. Доливо-Добровольского имели выдающееся значение для мировой электроэнергетики, совпали с генеральным направлением ее развития и не потеряли своей актуальности в наши дни.

Более подробно о жизни и научной деятельности Михаила Осиповича Доливо-Добровольского можно прочитать в следующих изданиях: *Веселовский О.Н.* Михаил Осипович Доливо-Добровольский. – М.: ГЭИ, 1958; *Белькинд Л.Д.* М.О. Доливо-Добровольский. К 25-летию со дня смерти. – Электричество, 1945, №3; *Угримов Б.И.* Пятьдесят лет трехфазного тока. – Электричество, 1940, №1; Люди русской науки. Очерки о выдающихся деятелях естествознания и техники/Под ред. *С.И. Вавилова*. – М.; Л.: Гос. изд-во техн.-теорет. лит-ры, 1948; *Кузнецов Б.Г.* Два века русской электротехнической мысли. – Электричество, 1940, №1; *Гусев С.А.* Очерки по истории развития электрических машин. – М.; Л.: ГЭИ, 1955; *Шателен М.А.* Русские электротехники второй половины XIX века. – М.: ГЭИ, 1955; *Веселовский О.Н.* и *Шнейберг Я.А.* Очерки по истории электротехники. – М.: Изд-во МЭИ, 1993.

*Григорьев Н.Д., канд. техн. наук*

\* \* \*

## О возможности сооружения на линиях СВН устройств продольной емкостной компенсации без шунтирующих реакторов на выводах конденсаторных батарей

РЫЖОВ Ю.П., НЕКУКАР А.Р.

*Анализируются режимные характеристики управляемых линий с двумя устройствами продольной емкостной компенсации при изменении расстояния между ними. Показано, что существуют оптимальные расстояния, при которых напряжения на выводах конденсаторных батарей будут меньше допустимого значения во всех режимах работы. Эти расстояния определены для линий различной длины.*

**Ключевые слова:** управляемые линии, продольная емкостная компенсация, конденсаторные батареи, напряжение, оптимальные расстояния

В настоящее время большое внимание уделяется повышению пропускной способности линий электропередачи, что объясняется ростом нагрузки,

*The operating characteristics of controlled power lines equipped with two devices of series capacitive compensation placed at different distances from each other are analyzed. It is shown that there are optimal distances with which the voltages at the terminals of capacitor banks will be smaller than the permissible level in all modes of operation. These distances are determined for lines of different lengths.*

**Key words:** controlled power lines, series capacitive compensation, capacitor banks, voltage, optimal distances

соответствующим возрастанием перетоков активной мощности по линиям и проблемами, связанными с сооружением новых линий. В качестве од-

ного из средств решения этой задачи для протяженных линий используются устройства продольной емкостной компенсации (УПК).

Эти устройства известны давно. Они не получили большого применения в нашей стране, но достаточно широко применяются в мировой практике (США, Швеция, Китай, Индия, Австралия). Поскольку сейчас разработаны средства управления степенью компенсации (TCSC или ТУПК), такие компенсирующие устройства могут быть использованы не только для повышения пропускной способности отдельных линий, но и для решения ряда системных задач, таких как повышение динамической устойчивости связываемых систем, оптимизация распределения потоков мощности в сложной неоднородной сети и некоторые другие.

Известны два пути выполнения продольной емкостной компенсации – сосредоточенная компенсация и распределенная. В первом случае УПК сооружается только в одной точке какой-либо линии (промежуточная подстанция или переключательный пункт). Во втором случае УПК сооружаются в двух или более точках одной и той же линии. Емкостное сопротивление каждого из УПК выбирается так, чтобы их сумма была равна значению, определяющему заданную степень компенсации этой линии.

Одним из недостатков, присущих сосредоточенной компенсации, является повышение напряжения на выводах конденсаторной батареи (КБ) в режимах холостого хода (х.х.) и малых нагрузок линии, что вынуждает применять шунтирующие реакторы (ШР), включаемые на выводы КБ. Это приводит к усложнению схемы УПК и увеличению стоимости всего устройства.

При распределенной компенсации емкостное сопротивление каждого из УПК составляет лишь долю общего сопротивления, определяемого заданной степенью компенсации. Поэтому напряжение на его выводах должно быть меньше, чем на УПК, сосредоточенном в одном месте.

На рис. 1 приведены зависимости напряжений на выводах КБ от длины линии для режима х.х. последней. Эти зависимости построены для двух случаев расположения УПК. В первом из них одно УПК расположено в середине линии, во втором два УПК расположены по концам этой же линии. Степени компенсации в обоих случаях равны.

Эти зависимости имеют разный характер. В первом случае напряжение на выводах КБ с увеличением длины линии возрастает и при некоторой длине становится больше допустимого значения и продолжает возрастать.

Во втором случае напряжение снижается, оставаясь всегда существенно ниже допустимого. Одна-

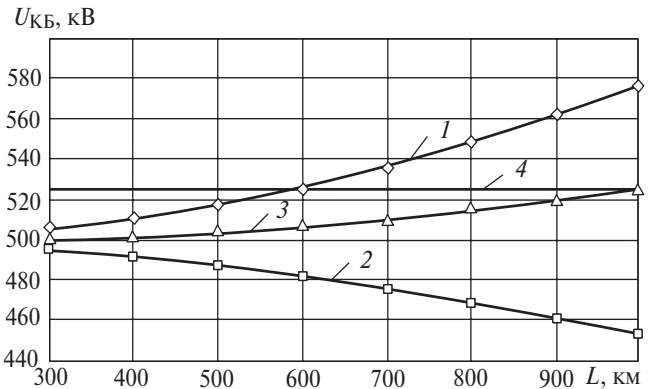


Рис. 1. Напряжения на выводах КБ и в средней точке линии для линий различной длины в режиме х.х. ( $P_1 = 0$ ) при  $k_c = 0,4$ : 1 – оба УПК расположены в центре линии; 2 – УПК расположены по концам линии; 3 – напряжение в середине линии для второго случая; 4 – допустимое напряжение  $U = 525$  кВ

ко это справедливо только для режима х.х. Как будет показано далее, и в этом случае в режиме наибольших нагрузок напряжения на выводах УПК также могут превосходить допустимое значение.

Отсюда возникает задача нахождения условий, при которых напряжение на выводах УПК будет ниже допустимого во всех режимах. Здесь следует подчеркнуть, что речь идет лишь о технических возможностях осуществления таких режимов.

К сожалению, в отечественной литературе, посвященной продольной емкостной компенсации, как правило, рассматривалась только сосредоточенная компенсация [1–3 и более ранние], поэтому ряд вопросов остается неясным. К их числу относятся:

оптимальное расстояние между УПК как с точки зрения ее пропускной способности, так и напряжения на выводах УПК;

распределение реактивной мощности и напряжения по линии в различных нормальных режимах работы;

предельно допустимая степень компенсации и другие возможные режимные ограничения;

характеристики режима одностороннего включения линии.

Анализ проводился для одноцепных линий 500 кВ с проводами 3 АС-400/51 длиной от 300 до 1000 км без промежуточных отборов мощности. Рассматривались линии с двумя УПК, одно из которых управляемое, другое – неуправляемое с неизменной степенью компенсации (рис. 2,а).

В качестве инструмента исследования применялся метод эквивалентного четырехполюсника [4]. Этот метод дает возможность, используя достаточно простой математический аппарат, определить параметры режима в узловых точках электропередачи и построить их зависимости от расстояния между двумя УПК.

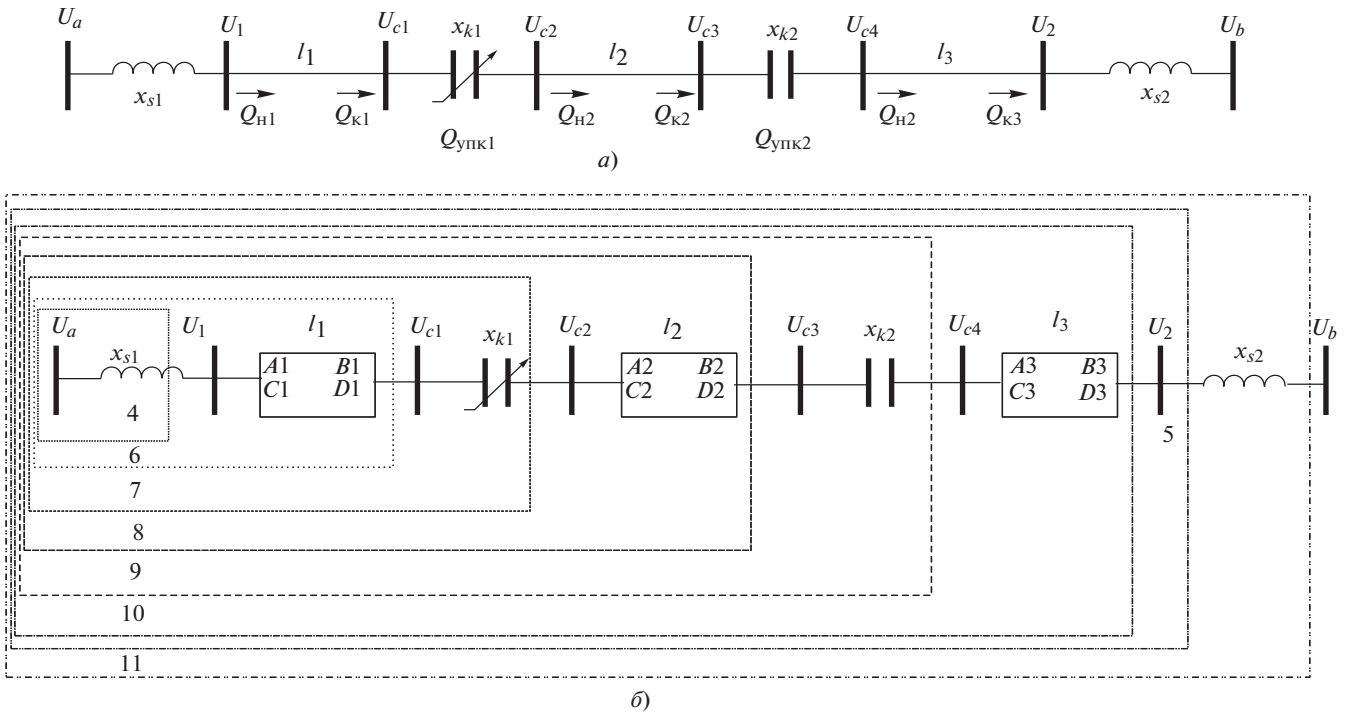


Рис. 2. Схема линии электропередачи (а) и ее представление в виде эквивалентных четырехполюсников (б)

Параметры четырехполюсников, представляющих отдельные участки линии, определялись по известным методикам с использованием гиперболических функций комплексных переменных. Результаты расчетов проверялись по другой методике, где участки линии были представлены П-схемами замещения. Расчеты выполнялись в программной среде Mathcad.

Поскольку основной задачей являлось определение оптимального расстояния между двумя УПК, в расчетах рассматривалось их перемещение из центра линии к ее концам.

При анализе были приняты следующие допущения:

- два УПК перемещаются симметрично относительно центра линии;
- потери активной мощности на корону не учитываются;
- наибольшее допустимое напряжение на выводах КБ равно наибольшему рабочему напряжению (для принятого класса напряжения  $U_{доп} = 525$  кВ).

На основании допущения о симметричном перемещении УПК при  $l_1 = l_3$  можно записать

$$l_1 = (L - l_2) / 2. \tag{1}$$

Это дает возможность представить все параметры режима как функцию расстояния между двумя УПК.

Суммарное емкостное сопротивление всех УПК, установленных на линии, определяется как

$$\sum_{i=1}^n x_{ki} = k_c x_{л}, \tag{2}$$

где  $k_c$  – заданная степень компенсации, определяемая из расчета пропускной способности линии (в расчетах степень компенсации изменялась от 20 до 60%);  $x_{л} = jZ_B \sin l$  – реактивное сопротивление некомпенсированной линии;  $Z_B$  – волновое сопротивление линии;  $l$  – ее волновая длина.

В рассматриваемом случае общее сопротивление УПК равно:

$$\sum_{i=1}^n x_{ki} = x_{k1} + x_{k2}, \tag{3}$$

где  $x_{k1}$  – переменное сопротивление управляемого УПК 1;  $x_{k2}$  – неизменное сопротивление неуправляемого УПК 2.

Если принять  $x_{k2} = 0,2x_{л}$ , то требуемое сопротивление управляемой УПК

$$x_{k1} = (k_c - 0,2)Z_B \sin l. \tag{4}$$

Здесь следует отметить, что (4) не учитывает места установки УПК. Поэтому в математической модели линии значение коэффициента  $B_3$  – коэффициента эквивалентного четырехполюсника, определяющего пропускную способность линии, будет изменяться при перемещении двух УПК по линии. Это будет приводить к изменению фактической степени компенсации.

В статье рассматриваются реальные линии. Активное сопротивление проводов оказывает заметное влияние на параметры режима (напряжения в узловых точках электропередачи, реактивные мощности участков линии), и это влияние возрастает при увеличении степени компенсации.

Для линий с двумя УПК следует ввести два понятия оптимального расстояния между ними: первое — по условию наибольшей пропускной способности, другое — по условию напряжений на выводах КБ.

Рассмотрим первое условие. Пропускная способность компенсированной линии определяется, в основном, минимальным значением коэффициента  $B_3$  эквивалентного четырехполюсника, замещающего линию. Характер изменения этого коэффициента в зависимости от расстояния между УПК — волновой длины второго участка линии  $l_2$  (при  $x_{s1} = x_{s2} = 0$ ) приведен на рис. 3. Анализ этих

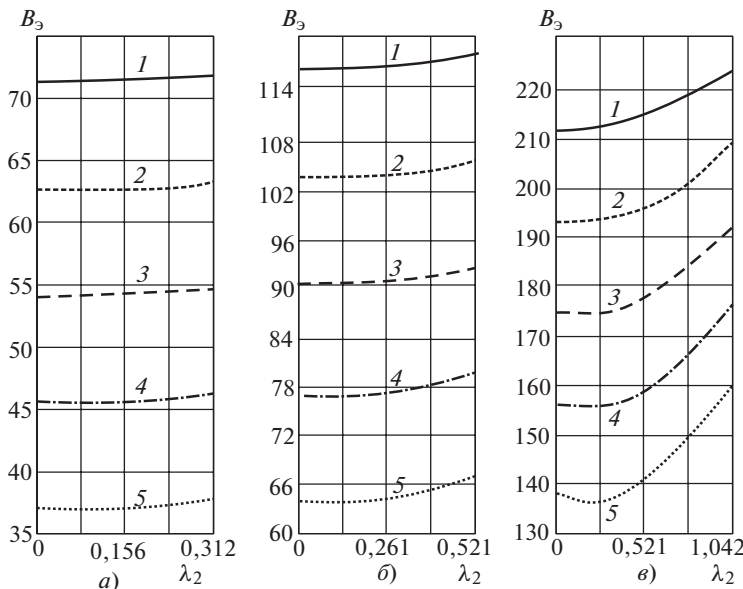


Рис. 3. Зависимость коэффициента  $B_3$  от расстояния  $l_2$  между двумя УПК для реальной линии: а — длиной 300 км; б — 500 км; в — 1000 км; 1 —  $k = 0,2$ ; 2 — 0,3; 3 — 0,4; 4 — 0,5; 5 — 0,6

зависимостей позволяет сделать следующие выводы.

Для линий длиной 300–500 км значение коэффициента  $B_3$  мало зависит от расстояния между двумя УПК. Диапазон изменения этого коэффициента для линии длиной 300 км составляет 1–2%, для линий длиной 500 км — 2–5%. Явно выраженный минимум здесь отсутствует. Это говорит о том, что для таких линий расстояние между УПК с точки зрения повышения пропускной способности линии не играет существенной роли: УПК могут быть сооружены как в центре линии, так и по ее концам.

Для линий длиной от 600 до 1000 км при изменении расстояния между УПК такой минимум проявляется. Анализ показывает, что оптимальное расстояние между УПК для этих линий по первому условию составляет ориентировочно от 100 до 200 км в зависимости от степени компенсации. Поскольку при таких расстояниях УПК оказыва-

ются расположенными недалеко от центра линии, можно ожидать, что напряжения на выводах КБ будут превышать допустимое значение, что подтверждено дальнейшими расчетами. Поэтому основную роль в решении поставленной задачи будет играть второе условие.

Режимные характеристики линий различной длины были проанализированы при изменении расстояния между двумя УПК ( $l_2$ ) от нуля, чему соответствует размещение двух УПК в центре линии, до  $L$ , что означает установку этих УПК по концам линии. Расчеты проводились для различных значений передаваемой мощности от нуля до наибольшей возможной при различных степенях компенсации. Ниже приводятся результаты этого анализа.

**Линия длиной 300 км.** Пропускная способность некомпенсированной линии такой длины, определенная по условиям статической апериодической устойчивости, превышает допустимую мощность по условию нагрева проводов. Поэтому линия такой длины не нуждается в применении продольной емкостной компенсации для увеличения пропускной способности. Однако при работе такой линии в составе сложной неоднородной сети управляемая продольная компенсация может быть использована как средство оптимизации распределения потоков мощности в этой сети. Если рассматривать эту возможность, то, как показывают расчеты, ее применение не вызовет каких-либо затруднений. Напряжения на выводах КБ не будут превышать допустимых значений во всех режимах и при установке УПК в любой точке линии, и при любых значениях  $l_2$ . Для линий такой длины шунтирующие реакторы на выводах КБ не нужны.

**Линия длиной 500 км.** Зависимости напряжений на выводах КБ от расстояния между УПК (длины второго участка линии  $l_2$ ) в различных режимах приведены на рис. 4.

В режиме х.х. и относительно небольших нагрузок (до натуральной мощности 860 МВт) эти зависимости имеют падающий характер (рис. 4,а). При дальнейшем возрастании передаваемой по линии мощности примерно до 1000 МВт характер этих зависимостей меняется, и напряжения на выводах КБ при увеличении расстояния  $l_2$  сначала снижаются, затем начинают возрастать. При мощности 1400 МВт одно из напряжений ( $U_{c3}$ ) становится равным предельно допустимому значению при  $l_2 = 500$  км (рис. 4,б), т.е. при расположении двух УПК на конечных подстанциях данной линии.

Это повышение напряжения объясняется тем, что при увеличении передаваемой мощности воз-

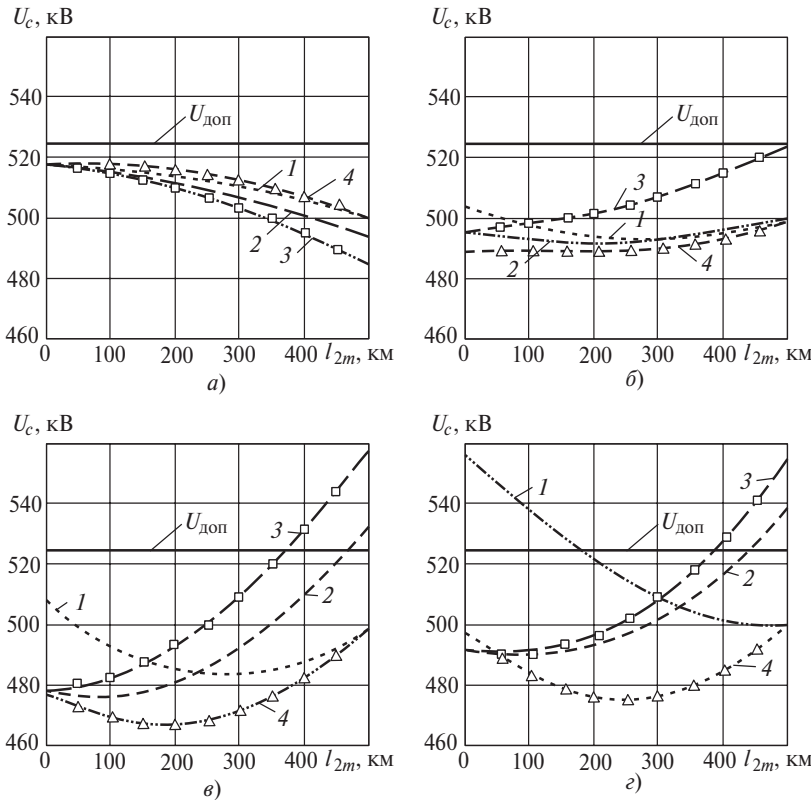


Рис. 4. Зависимости напряжений на выводах КБ от длины второго участка для линии 500 км: а –  $P_1 = 0$ ;  $k_c = 0,3$ ; б –  $P_1 = 1400$  МВт,  $k_c = 0,3$ ; в –  $P_1 = 2000$  МВт,  $k_c = 0,4$ ; г –  $P_1 = 2000$  МВт,  $k_c = 0,6$

растает ток в линии и, как следствие, увеличивается генерация реактивной мощности конденсаторами УПК. Увеличение длины второго участка приводит к увеличению его индуктивного сопротивления, в результате чего возрастает напряжение  $U_{c3}$ .

Приведенные результаты говорят о том, что при наибольшей передаваемой мощности до 1400 МВт

(эта величина определяется ролью данной линии в системе) УПК могут быть сооружены на любом расстоянии между ними, в том числе и на конечных подстанциях, без применения ШР на выводах КБ.

Если же передаваемая мощность должна быть увеличена вплоть до допустимой по нагреву проводов (2000 МВт), что может потребоваться в послеаварийных режимах, то расстояние между УПК должно составлять от нуля до 350 км при степени компенсации  $k_c = 0,4$ . На конечных подстанциях их сооружать нельзя из-за значительного повышения напряжения на некоторых выводах КБ (рис. 4, в).

При увеличении степени компенсации до 0,6, что может потребоваться по соображениям динамической устойчивости связываемых линией систем, в случае расположения обоих УПК вблизи центра линии (малые значения  $l_2$ ) происходит резкое возрастание напряжения  $U_{c1}$  (рис. 4, г). Затем оно снижается  $U_{c1}$ . В результате образуется зона расстояний между УПК, в которой напряжения на выводах КБ будут ниже допустимых значений. Оптимальным представляется расстояние в 300 км. В табл. 1 и 2 приведены режимные характеристики линии длиной 500 км при  $l_2 = 300$  км.

В рассматриваемом случае напряжения на выводах КБ для линий длиной 500 км остаются ниже допустимых значений во всем диапазоне возмож-

Таблица 1

Передаваемая мощность $P_1$ , МВт	Напряжения на выводах КБ, кВ				
	$U_{c1}$	$U_{c2}$	$U_{c3}$	$U_{c4}$	$U_{cp}$
$k_c = 0,2$					
0	509	509	503	513	513
860	502	502	507	504	505
$k_c = 0,4$					
0	511	503	503	511	509
860	508	499	506	503	503
2000	483	492	509	471	470

Таблица 2

Передаваемая мощность $P_1$ , МВт	Реактивная мощность участков линии, Мвар ( $k_c = 0,4$ )								Потери $DP$ , МВт	Угол $d$
	$Q_{н1}$	$Q_{к1}$	$DQ_{УПК1}$	$Q_{н2}$	$Q_{к2}$	$DQ_{УПК2}$	$Q_{н3}$	$Q_{к3}$		
0	-229	-141	2,0	-139	139	2,0	141	229	0,647	» 0
860	-201	-292	87	-115	-103	80	-23	-15,2	35,6	18,5°
2000	319	-98	482	384	-875	466	-409	-807	204	45°

ных нагрузок, что позволяет говорить о возможности сооружения УПК без реакторов на выводах КБ.

В то же время компенсирующие устройства потребуются для компенсации значительных потоков реактивной мощности на концах линии. Их мощность и тип должны определяться по условиям требуемого баланса реактивных мощностей в узлах подключения данной линии к шинам передающей и приемной систем соответственно.

Линия длиной 600 км. Дальнейшее увеличение длины линии до 600 км приводит к тому, что напряжения на выводах КБ в режиме холостого хода линии начинают несколько превышать допустимое значение в случае, если оба УПК расположены в центре линии. При симметричном перемещении этих УПК относительно ее центра напряжения на выводах КБ снижаются и становятся меньше допустимого значения. При этом граница перехода зависит от степени компенсации. Так, при  $k_c = 0,4$   $l_2 \gg 108$  км, при  $k_c = 0,5$   $l_2 \gg 190$  км (рис. 5,а).

При увеличении передаваемой мощности до натуральной (860 МВт) напряжения на выводах КБ также имеют падающий характер и остаются ниже допустимых значений. Начиная с мощности 1100 МВт, возрастает напряжение  $U_{c3}$ , т.е. здесь происходят процессы, идентичные процессам в линии длиной 500 км.

При увеличении передаваемой мощности до 2000 МВт ( $k_c = 0,5$ ), что на 60% превышает наибольшую передаваемую мощность по некомпенсированной линии рассматриваемой длины, напряжения на некоторых выводах КБ становятся больше допустимого значения. Это происходит при расстоянии между УПК 425 км (рис. 5,б). Здесь также образуется зона расстояний между УПК, в

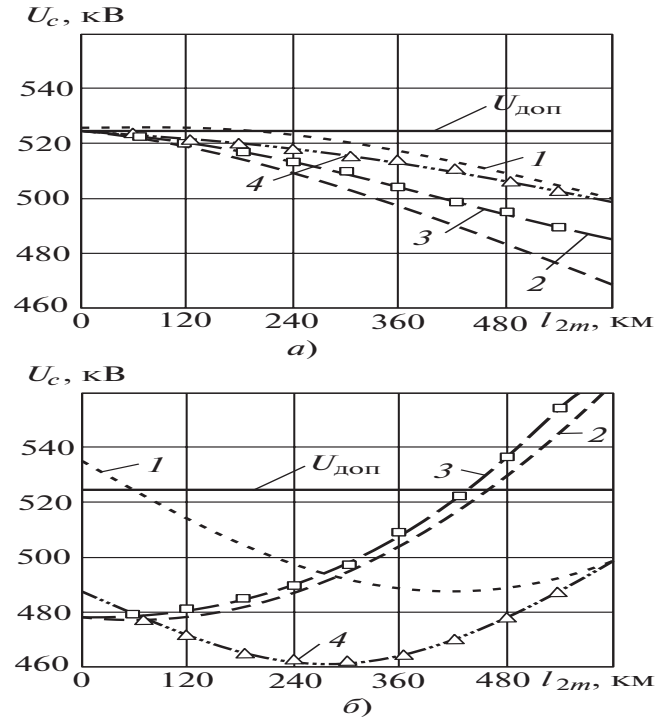


Рис. 5. Зависимости напряжений на выводах КБ от длины второго участка  $l_2$  для линии 600 км,  $k_c = 0,5$ : а –  $P_1 = 0$ ; б –  $P_1 = 2000$  МВт, 1–4 см. рис. 4)

которой напряжения на выводах КБ будут меньше допустимых во всех режимах работы.

Полученные результаты говорят о том, что при указанной мощности сооружение УПК как в центре линии, так и на концевых подстанциях возможно только с применением ШР. Если нужно обойтись без применения этих реакторов, то расстояние между УПК должно быть в диапазоне от 110 до 420 км. Наиболее приемлемое расстояние – около 350 км. В табл. 3 и 4 приведены напряжения

Таблица 3

Передаваемая мощность $P_1$ , МВт	Напряжения на выводах КБ, кВ				
	$U_{c1}$	$U_{c2}$	$U_{c3}$	$U_{c4}$	$U_{cp}$
0	519	499	505	515	511
860	517	495	509	503	502
1200	512	496	509	495	495
2000	489	504	508	464	464

Таблица 4

Передаваемая мощность $P_1$ , МВт	Реактивная мощность участков линии, Мвар								Потери $DP$ , МВт	Угол $d$
	$Q_{н1}$	$Q_{к1}$	$DQ_{УПК1}$	$Q_{н2}$	$Q_{к2}$	$DQ_{УПК2}$	$Q_{н3}$	$Q_{к3}$		
0	-304	-195	7,0	-188	134	3,0	137	248	1,24	0
860	-286	-290	156	-134	-121	92,5	-28,5	-17,2	42,9	19°
1200	-198	-305	293	-12	-293	182	-111	-199	82,7	27°
2000	236	-277	835	558	-897	542	-355	-846	242	47°

на выводах КБ и режимные характеристики линии для этого случая ( $l_2 = 350$  км,  $k_c = 0,5$ ).

Если же наибольшая передаваемая мощность меньше 1250 МВт, что предполагает и применение меньшей степени компенсации ( $k_c = 0,3 \text{ } \ddot{0} \text{ } 0,4$ ), то сооружение УПК возможно на конечных подстанциях без ШР.

На рис. 6 показано распределение напряжения вдоль линии длиной 600 км в режиме холостого хода. Благодаря скачкам напряжения на конденсаторах УПК1 и УПК2 напряжение на втором участке оказывается сниженным по сравнению с некомпенсированной линией. Поэтому напряжение в средней точке линии оказывается меньше допустимого значения. Глубина скачка напряжения на КБ

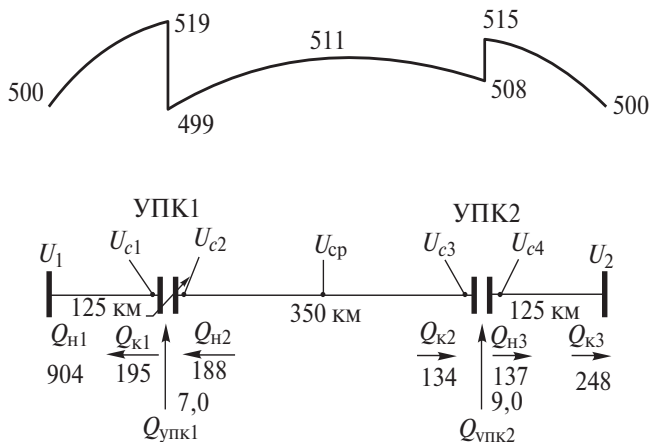


Рис. 6. Распределение напряжения и реактивной мощности вдоль линии длиной 600 км в режиме х.х. ( $P = 0$ )

зависит от степени компенсации и увеличивается с ростом последней.

Отметим, что для некомпенсированной линии такой длины напряжение в средней точке равно допустимому значению и будет превышать его по мере увеличения длины линии, что недопустимо. Однако для компенсированных линий рассматриваемого типа длиной свыше 600 км будет наблюдаться подобная картина, и напряжение в средней точке не будет превышать допустимого значения. При необходимости можно увеличить степень компенсации до необходимой. Таким образом, большая степень компенсации может использоваться не только в режимах больших нагрузок, но и в режимах холостого хода и малых нагрузок.

В то же время, при дальнейшем увеличении длины линии свыше 600 км увеличивается длина второго участка ( $l_2$ ), при которой напряжения на выводах КБ в режимах х.х. и малых нагрузок остаются выше допустимых значений. Их переход через границу допустимого осуществляется при все больших значениях  $l_2$ .

Линия длиной 750 км. Для линий такой длины зависимости напряжений на выводах КБ от значе-

ния  $l_2$  в различных режимах подобны аналогичным зависимостям линии 600 км. Однако, как уже отмечено, снижение этих напряжений в режиме х.х. до допустимого значения происходит при значительно большей длине  $l_2$ , чем ранее. В данном случае это происходит при  $l_2 = 460$  км.

В режиме наибольших нагрузок возрастание напряжения  $U_{c3}$  до допустимого значения осуществляется при меньшей активной мощности, меньшей допустимой степени компенсации и большей длине второго участка линии, чем ранее ( $P_1 = 1700$  МВт,  $k_c = 0,5$ ,  $l_2 = 535$  км). В результате сужается зона значений  $l_2$ , в которой напряжения на выводах КБ во всех режимах будут ниже допустимых значений. Для линии длиной 750 км эта зона находится в пределах от 460 до 535 км. Оптимальным расстоянием в данном случае является  $l_2 = 500 \text{ } \ddot{0} \text{ } 520$  км.

Следует отметить, что увеличение степени компенсации до  $k_c = 0,6$  для повышения передаваемой мощности до 2000 МВт невозможно, поскольку в этом случае наблюдается резкий рост напряжения на одном из выводов КБ ( $U_{c2}$ ) при изменении значения  $l_2$ , и это напряжение становится больше допустимого при  $l_2 < 460$  км. Поэтому благоприятная зона, о которой шла речь ранее, исчезает.

Значения напряжений на выводах КБ и режимные характеристики линии рассматриваемой длины приведены в табл. 5 и 6 ( $l_2 = 500$  км,  $k_c = 0,5$ ).

При указанных значениях наибольшей передаваемой мощности сооружение УПК без применения ШР возможно только в указанной выше зоне. Сооружение УПК на конечных подстанциях без ШР возможно только при снижении передаваемой мощности до 1100 МВт, что на 13% превышает наибольшую мощность некомпенсированной линии и вряд ли целесообразно.

Значительные стоки реактивной мощности с линии в режимах х.х. и малых нагрузок, а также потребление этой мощности линией в режиме наибольших нагрузок потребуют применения соответствующих компенсирующих устройств на шинах передающей и приемной подстанций.

Линия длиной 1000 км. Зависимости напряжений на выводах КБ от значения  $l_2$  для линий этой длины в режиме х.х. подобны приведенным ранее для линий меньшей длины. Однако в данном случае все они идут выше допустимого напряжения практически во всем диапазоне изменения значений  $l_2$  и пересекают границу допустимого лишь при  $l_2 > 800$  км. Поэтому в этом случае УПК можно располагать только на конечных подстанциях линии. При этом напряжения на выводах КБ в режиме х.х. линии будут много меньше допустимого значения (478, 449 кВ).

Однако при возрастании нагрузки до натуральной мощности эти напряжения несколько увеличиваются, оставаясь пока ниже допустимого (495÷500 кВ). Дальнейший рост нагрузки приводит к резкому возрастанию напряжения  $U_{c3}$ . Но при мощности до 1030 МВт ( $k_c = 0,3$ ) это напряжение еще остается ниже допустимого значения. Дальнейшее увеличение передаваемой мощности приводит к тому, что напряжения на выводах КБ возрастают сверх допустимого.

Таким образом, по линии длиной 1000 км при расположении двух УПК по концам линии и отсутствии ШР можно передать мощность не более 1000 МВт. Это примерно на 25% больше мощности, которую можно передать по некомпенсированной линии.

В случае, если по данной линии требуется передать мощность больше указанной, необходимо искать другие решения. В качестве таких решений могут быть рассмотрены:

применение шунтирующих реакторов на выводах КБ;

увеличение числа УПК;

изменение расположения УПК и изменение степеней компенсации по сравнению с принятыми ранее.

Для линии длиной 1000 км была рассмотрена иная схема расположения УПК на линии, в которой использованы три УПК, включенные в начале, середине и в конце линии. Все УПК управляемые. Дальнейшие расчеты показали, что можно оставить только два управляемых УПК: одно УПК в начале линии, второе в центре. Непременным условием является изменение их степеней компенсации для каждого режима. При этом напряжения на всех выводах КБ остаются в допустимых пределах во

всем рассмотренном диапазоне передаваемых мощностей.

Напряжения на выводах КБ и режимные параметры такой линии приведены в табл. 7 и 8. Там же указаны степени компенсации каждой УПК, необходимые для каждого режима. Здесь следует отметить, что  $k_{c2} = 0$  означает шунтирование КБ. При такой расстановке УПК и степенях компенсации передаваемая мощность может быть увеличена до 1370 МВт, что на 70% больше мощности некомпенсированной линии.

Параметры режима рассматриваемой линии имеют некоторые особенности, на которые следует обратить внимание:

в режиме х.х. и малых нагрузок наблюдаются значительные стоки реактивной мощности, особенно в начале линии; это объясняется большой длиной линии, наличием в ее начале мощной КБ, включенной последовательно, а также влиянием активных сопротивлений проводов;

допустимые значения напряжений на выводах КБ в этом режиме могут быть получены только при повышенной степени компенсации первой УПК; вторая УПК, расположенная в центре линии, должна быть зашунтирована (современные схемы УПК предусматривают такую возможность);

значительное потребление реактивной мощности линией от приемной системы в режимах больших нагрузок.

Вопросы компенсации реактивной мощности по концам линии должны решаться в каждом конкретном случае с учетом требований передающей и приемной систем.

Приведенные результаты были получены при постоянстве напряжений на шинах передающей и приемной подстанций  $U_1 = U_2 = 500$  кВ, т.е. для

Таблица 5

Передаваемая мощность $P_1$ , МВт	Напряжения на выводах КБ, кВ				
	$U_{c1}$	$U_{c2}$	$U_{c3}$	$U_{c4}$	$U_{cp}$
0	525	492	503	519	515
860	519	491	510	505	501
1200	510	497	513	494	489
1700	489	513	518	467	459

Таблица 6

Передаваемая мощность $P_1$ , МВт	Реактивная мощность участков линии, Мвар								Потери $DP$ , МВт	Угол $d$
	$Q_{н1}$	$Q_{к1}$	$DQ_{УПК1}$	$Q_{н2}$	$Q_{к2}$	$DQ_{УПК2}$	$Q_{н3}$	$Q_{к3}$		
0	-383	-280	18,0	-262	195	6,0	201	309	2,2	0
860	-317	-322	190	-132	-111	108	-3	11,4	52,6	24,5°
1200	-181	-288	352	64	-342	213	-129	-212	102	35°
1700	175	-163	724	561	-838	461	-377	-691	218	52°



Таблица 7

Передаваемая мощность $P_1$ , МВт	Степень компенсации $k_c$	Напряжения на выводах КБ, кВ			
		$U_{c1}$	$U_{c2}$	$U_{c3}$	$U_{c4}$
0	$k_{c1} = 0,35, k_{c2} = 0$	500	393	516	516
860	$k_{c1} = k_{c2} = 0,15$	500	482	518	509
1100	$k_{c1} = k_{c2} = 0,2$	500	496	494	481
1370	$k_{c1} = k_{c2} = 0,3$	500	516	481	464

Таблица 8

Передаваемая мощность $P_1$ , МВт	Реактивная мощность участков линии, Мвар							Потери $DP$ , МВт	Угол $d$
	$Q_{H1}$	$DQ_{УПК1}$	$Q_{H2}$	$Q_{K2}$	$DQ_{УПК2}$	$Q_{H3}$	$Q_{K3}$		
0	-604	129	-475	-189	0	-189	288	8,24	0
860	-297	126	-171	-174	100	-74	-0,515	67,3	43°
1100	-165	250	85	-239	236	-2,54	-266	116	52°
1370	-181	580	398	-398	582	184	-562	191	53°

случаев, когда не учитываются внутренние эквивалентные сопротивления передающей и приемной систем. В реальных условиях этого не бывает. Учет этих сопротивлений, как показывают расчеты, приводит к повышению напряжений в начале и конце линии в режимах малых нагрузок и понижению их в режимах наибольших нагрузок, а также к увеличению угла  $d$  между эквивалентными напряжениями двух систем. Последнее вынуждает ограничивать наибольшую передаваемую мощность.

Увеличение напряжений на шинах конечных подстанций вызывает увеличение напряжений на выводах КБ. Отклонение этих напряжений от принятого номинального значения приемлемо лишь до 506–508 кВ. При больших отклонениях напряжения на выводах КБ превышают допустимое значение. Отсюда следует важный вывод: для того чтобы исключить нежелательное повышение напряжений на выводах КБ, необходимо стабилизировать напряжение на шинах передающей и приемной подстанций. Для этой цели могут быть использованы различные известные в настоящее время средства, в том числе и управляемые шунтирующие реакторы (УШР).

При определении напряжений на выводах КБ необходимо также рассмотреть и режим одностороннего включения линии. Это, как правило, кратковременный режим, но он характеризуется повышением напряжения и поэтому может представлять опасность для оборудования компенсированной линии.

Анализ характеристик этого режима для линии длиной 500 км показывает, что при относительно невысокой степени компенсации ( $k_c = 0,4$ ) напряжения в конце линии и на выводах КБ превышают

допустимые значения. Увеличение степени компенсации до  $k_c = 0,6$  снижает эти напряжения до желаемых значений, но не полностью. Лишь дальнейшее увеличение до  $k_c = 0,7$  позволяет нормализовать все напряжения. Напомним, что для нормального режима этой линии требуется значительно более низкий коэффициент компенсации ( $k_c = 0,3$ ). При существующем способе управления степенью компенсации столь значительное ее увеличение, в принципе, возможно. Однако этот вопрос требует более детального изучения.

Для линий длиной более 500 км в режиме одностороннего включения только увеличение степени компенсации не является достаточным средством нормализации режима одностороннего включения. Для таких линий необходимо сочетать применение ШР, включенных по концам линии, и регулирование степени компенсации. Для этой цели могут быть использованы те компенсирующие устройства, о которых говорилось ранее. Эти устройства будут решать обе задачи – стабилизацию напряжения на шинах подстанций в нормальных режимах работы и нормализацию напряжений в режимах одностороннего включения.

В табл. 9 приводятся расчетные значения напряжений в режиме одностороннего включения линии с реактором в ее конце.

Таким образом, в режиме одностороннего включения компенсированной линии также можно обойтись без включения реакторов на выводах КБ. Реакторы нужны, но не на выводах КБ. Отметим, что здесь также нужны более глубокие исследования.

Следует отметить, что были рассмотрены только технические возможности выполнения УПК без

ШР на выводах КБ. Полностью исключить применение ШР на протяженных линиях СВН нельзя из-за особенностей последних. Насколько целесообразны рассмотренные решения, следует решать путем их технико-экономического сопоставления с другими вариантами повышения пропускной способности линии, в том числе и с вариантом УПК, где реакторы включены на выводы КБ.

Таблица 9

Длина линии	Значение $k_c$	Напряжения на выводах КБ и в конце линии в режиме одностороннего включения, кВ				
		$U_{c1}$	$U_{c2}$	$U_{c3}$	$U_{c4}$	$U_2$
$L = 600$ км $l_2 = 350$ км	0,4	513	505	415	509	489
	0,6	513	498	488	502	482
$L = 750$ км $l_2 = 500$ км	0,4	524	503	509	527	506
	0,5	523	493	499	516	496

**Выводы.** 1. Распределенная продольная емкостная компенсация позволяет снизить напряжения на выводах КБ по сравнению с сосредоточенной компенсацией.

2. Существуют оптимальные расстояния между УПК, при которых напряжения на выводах КБ во всех режимах оказываются меньше допустимых значений, что исключает необходимость включения ШР на эти выводы.

3. Необходимо ограничение роста напряжений на шинах конечных подстанций линии сверх рассчитанных значений с помощью компенсирующих устройств.

4. Проблема требует дальнейшего рассмотрения при иных схемах расположения УПК на линии, наличии промежуточных отборов мощности и других особенностях электропередачи.

5. Необходима технико-экономическая оценка предлагаемых решений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зарудский Г.К. О результатах исследований по применению продольной емкостной компенсации в электропередачах СВН. – Электричество, 2007, №9.

2. Ивакин В.Н. Исследование характеристик управляемой продольной компенсации как устройства для регулирования потоков мощности гибких линий электропередачи переменного тока. – Электротехника, 2006, № 3.

3. Поспелов Г.Е. Эффективность компенсирующих устройств для управления параметрами и режимами электрических сетей и их регулирования. – Изв. вузов и энергетических объединений СНГ. Энергетика, 2007, № 4.

4. Рыжов Ю.П. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения: Учебник для вузов. – М.: Издат. дом МЭИ, 2007.

[01.06.11]

*Авторы: Рыжов Юрий Петрович окончил электроэнергетический факультет (ЭЭФ) Московского энергетического института (МЭИ) в 1954 г. В 1968 г. защитил кандидатскую диссертацию «Вентильные источники реактивной мощности». Доцент кафедры «Электроэнергетические системы» МЭИ.*

*Некукар Амир Реза (Иран) окончил магистратуру ЭЭФ МЭИ в 2007 г. В 2010 г. защитил кандидатскую диссертацию «Режимные характеристики управляемых линий электропередачи с распределенной продольной емкостной компенсацией».*