

# КОМПАКТНЫЕ УПРАВЛЯЕМЫЕ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

## АВТОРЫ:

ШАКАРЯН Ю. Г.,  
Д.Т.Н., ПРОФ.  
ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

ПОСТОЛАТИЙ В. М.,  
Д.Т.Н.  
ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИ-  
КИ АН МОЛДОВЫ

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

КАРЕВА С. Н.  
ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

**Р**азработка новых эффективных средств передачи электроэнергии на большие расстояния и управление режимами энергосистем являются актуальными проблемами развития современной электроэнергетики.

В настоящее время в странах СНГ и за рубежом ведутся интенсивные работы по модернизации электро-

энергетических систем и поиску новых технологий для решения задач дальнейшего повышения эффективности энергосистем, улучшения экологических показателей, снижения затрат на строительство и эксплуатацию электросетевых объектов, повышения надежности энергоснабжения и энергетической безопасности.



Резкое увеличение потребления электрической энергии как в промышленной, так и в социальной сферах требует увеличения пропускной способности и управляемости линий электропередачи

На современном этапе все более актуальными становятся вопросы создания новых эффективных средств транспорта, распределения электроэнергии и управления режимами энергосистем.

Следует выделить три главные проблемы, стоящие перед российскими электроэнергетиками:

- повышение пропускной способности и управляемости магистральных и распределительных линий электропередачи и систем в целом;
- повышение экономических показателей электроэнергетических систем;
- уменьшение отчуждаемых под строительство линий электропередачи площадей и выполнение всех требований по ограничению экологического влияния ВЛ и энергетического оборудования.

Специфика электроэнергетической системы России состоит в значительной протяженности электрических сетей, что создает дополнительные сложности в управлении режимами энергосистемы и обеспечении достаточной устойчивости работы внутрисистемных и межсистемных электрических связей. Одной из проблем ЕНЭС России является раздельная работа энергообъединений внутри страны. До настоящего времени остаются работающими раздельно ОЭС Сибири и ОЭС Востока. Отсутствие синхронной связи этих энергообъединений создает ряд трудностей в обеспечении энергетической безопасности дальневосточного региона и восточной части ОЭС Сибири в условиях, связанных с экономическим развитием восточной части страны. Такая работа энергообъединений является существенным недостатком на фоне

международных тенденций по дальнейшему развитию и интеграции объединенных энергетических систем на региональном, государственном и международном уровнях.

Для решения этих проблем целесообразным представляется развитие существующих электрических сетей 220–500 кВ на базе современных технических решений как в области конструкций линий электропередачи, так и силового и регулирующего оборудования и систем управления, реализующих идеи активно-адаптивных электрических сетей.

В мировой практике нашли применение ВЛ с уменьшенными расстояниями между фазами (компактные линии) в одноцепном и многоцепном исполнении, а также ВЛ с расположением на одной опоре цепей различных классов напряжения.

Создание компактных ВЛ, оснащенных устройствами FACTS, в том числе средствами фазового управления и продольно-поперечной компенсации, – компактных управляемых ВЛ – является одним из наиболее эффективных средств транспорта электроэнергии. Компактные ВЛ, с улучшенными по сравнению с ВЛ традиционной конструкции технико-экономическими показателями, позволяют снизить затраты на транспорт электрической энергии в расчете на единицу передаваемой мощности за счет повышения пропускной способности электрической сети, эффективного использования устройств регулирования, сокращения площадей отчуждаемых земель.

Компактные ВЛ обеспечивают возможность регулирования электрических параметров линий за счет изменения характеристик электромагнитного поля в междуфазном и окружающем линию пространстве. Усиление электромагнитного поля внутри линии путем сближения фаз позволяет увеличить пропускную

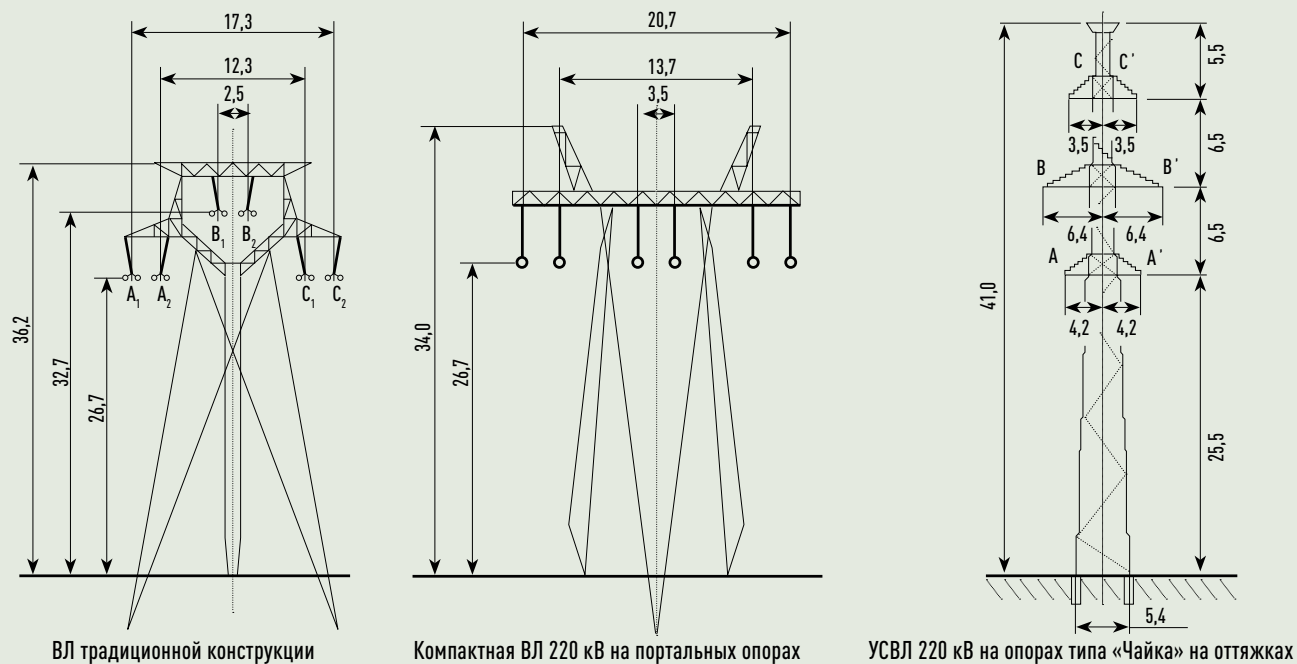
## ИНФОРМАЦИЯ

### КОМПАКТНЫЕ ВЛ

Увеличение пропускной способности электрической сети за счет применения компактных ВЛ в сочетании с устройствами FACTS оказывается одним из наиболее экономичных средств развития электрических сетей, поскольку позволяет снизить затраты на передачу мощности и энергии за счет уменьшения удельных затрат на строительство ВЛ и более эффективного использования устройств регулирования. При этом надо учитывать дополнительный эффект за счет повышения эффективности использования проводникового материала линии и сокращения площади земельных угодий, отчуждаемых под ВЛ.

За рубежом широкое применение нашли компактные ВЛ с уменьшенными расстояниями между фазами (компактные линии) на напряжение 110–500 кВ. Конструктивно ВЛ выполнены как одноцепными и многоцепными, так и с расположением на одной опоре цепей различных номинальных напряжений.

## СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХЦЕПНЫХ ВЛ 220 КВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ И ТРАДИЦИОННОЙ КОНСТРУКЦИИ



Вид ВЛ	Традиционной конструкции на одностоечных свободностоящих опорах		Компактная на порталных опорах, УСВЛ на опорах типа «Чайка» на оттяжках				
Угол сдвига фаз, $\theta^\circ$	---	120°	120°	180°			
Число проводов в фазе	1	2	2	2578,8	1,17*	2578,8	1,17*
Волновое сопротивление, Ом	206,3	123,7	0,6*	118,9	0,58*	107,8	0,52*
Натуральная мощность ВЛ, $P_{\text{нат}}$ , МВт	304,6	509,0	1,67*	529,0	1,74*	583,0	1,91*
Натуральная мощность на одну цепь $P_{\text{нат}}$ , МВт	152,3	254,5	1,67*	264,5	1,74*	291,5	1,91*
$P_{\text{нат}}/L_k$ , МВт/м	5,77	8,39	1,45*	9,23	1,6*	10,17	1,76*
$P_{\text{нат}}/S_{Al}$ , МВт/мм <sup>2</sup>	0,176	0,147	0,84*	0,153	0,87*	0,168	0,95*
Стоимость ВЛ на стальных опорах, тыс. руб./км	2195	2613,6	1,19*	2578,8	1,17*	2578,8	1,17*
Стоимость 1 км ВЛ, тыс. руб./МВт	7,2	5,13	0,71*	4,87	0,68*	4,42	0,61*

\*Относительно традиционной двухцепной ВЛ 220 кВ

способность и улучшить электрические и технические параметры ВЛ. Ослабление электромагнитного поля во внешнем пространстве приводит к улучшению экологической обстановки вдоль трассы ВЛ. Электрические параметры компактных ВЛ при работе в нормальных сим-

метричных режимах сохраняются неизменными. Выравнивание электрических параметров фаз цепей осуществляется за счет транспозиции фаз внутри каждой цепи.

Применение на компактных ВЛ различных устройств поперечной

или продольной компенсации приводит к изменению эквивалентных параметров электропередачи в целом, при этом собственные параметры линии (индуктивное сопротивление, емкостная проводимость, волновое сопротивление) не изменяются.

увеличение пропускной способности в 1,3–1,6 раза

снижение суммарных затрат на 10–20% в расчете на единицу передаваемой мощности

повышение эффективности устройств регулирования реактивной мощности

уменьшение суммарной мощности и стоимости устройств регулирования реактивной мощности и напряжения

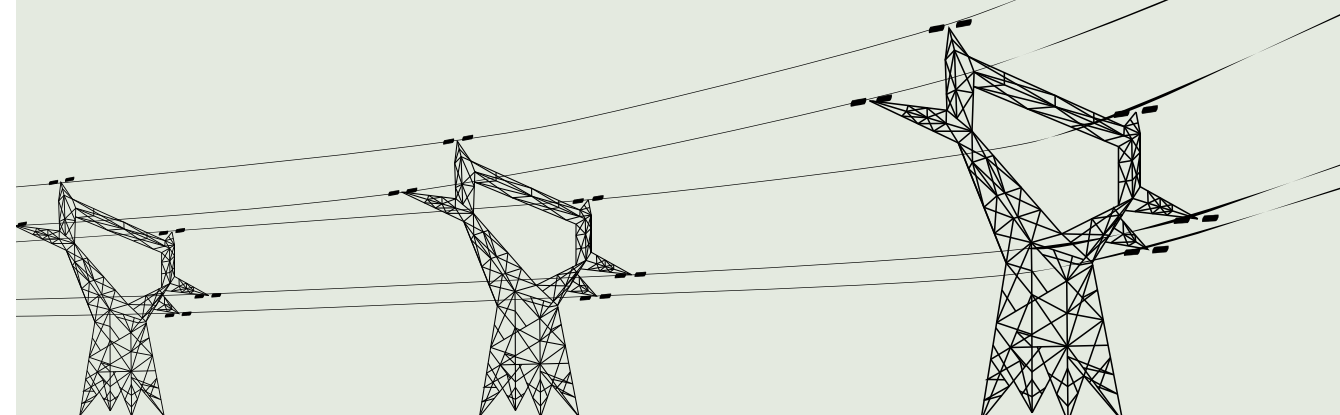
## ОСНОВНЫЕ ПРЕИМУЩЕСТВА ВЛ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

обеспечение управления величиной и направлением потоков мощности в электрических сетях

сокращение в 1,5–2 раза площади земельных угодий, отчуждаемых под воздушные линии

повышение механической устойчивости ВЛ при воздействии неблагоприятных атмосферных факторов

снижение суммарных потерь электроэнергии в энергосистеме



Компактные двухцепные ВЛ позволяют осуществлять не только внешнее, но и внутреннее регулирование параметров линии в целом (самокомпенсация эквивалентных параметров), что достигается путем изменения взаимного электромагнитного влияния сближенных цепей. Линии

электропередачи, обладающие такими свойствами, получили название управляемых самокомпенсирующихся воздушных линий (УСВЛ).

УСВЛ регулируют параметры электрического и магнитного поля отдельно фаз и цепей, что обеспе-

чивает управление эквивалентными параметрами ВЛ и величиной передаваемой мощности. Регулирование характеристик ВЛ целесообразно осуществлять для обеспечения заданных режимов как линии, так и энергосистемы в целом. Оно осуществляется путем изменения угла

ИНФОРМАЦИЯ

## ФАЗОПОВОРОТНЫЕ УСТРОЙСТВА (ФПУ)

Устройства, состоящие из двух трансформаторов, устанавливаемых в начале линии (у источника энергии): регулируемого, который включается параллельно линии, и серийного, вторичная обмотка которого включается последовательно в линию. При этом за счет схемы соединения обмоток вектор напряжения на серийной обмотке направлен под углом 90 электрических градусов к фазному напряжению сети. Изменяя напряжение на серийной обмотке с помощью регулируемого трансформатора, можно осуществлять поворот вектора суммарного напряжения в начале сети и, следовательно, управлять углом между напряжениями в начале и конце линии, изменяя поток мощности, передаваемой по ней. Другой возможностью реализации ФПУ является использование так называемого объединенного регулятора потока мощности, образуемого каскадным включением двух преобразователей напряжения, один из которых включается параллельно линии, а другой последовательно.

сдвига  $\theta$  системы векторов напряжений фаз одной цепи по отношению к системе векторов напряжений фаз другой цепи в пределах 0–180°.

Изменение угла  $\theta$  может быть плавным или дискретным. Для плавного регулирования требуются фазоповоротные устройства (ФПУ), которые могут совмещать в себе функции трансформаторов или автотрансформаторов. Наиболее простым, но вместе с тем достаточно эффективным является дискретное регулирование, обеспечивающее два режимных состояния УСВЛ, а именно  $\theta=0^\circ$  или  $\theta=120^\circ$ . Такое регулирование может быть осуществлено путем переключения соответствующих фаз на одной из цепей.

При угловом сдвиге  $\theta=0^\circ$  УСВЛ обладает минимальной пропускной способностью, а при  $\theta=120^\circ$  (180°) – максимальной, которая превышает пропускную способность ВЛ традиционной конструкции того же класса напряжения в 1,3–1,6 раза.

Компактные управляемые ВЛ (по сравнению с ВЛ традиционной конструкции) обеспечивают:

- увеличение пропускной способности в 1,2–1,6 раза;
- снижение суммарных затрат не менее чем на 20% в расчете на единицу передаваемой мощности;
- осуществление в энергосистемах принудительного перераспределения потоков активной и реактивной мощности;
- повышение эффективности использования устройств регулирования реактивной мощности;
- уменьшение суммарной мощности и стоимости устройств регулирования реактивной мощности и напряжения;

- снижение суммарных потерь электроэнергии в энергосистеме;
- повышение механической устойчивости ВЛ при воздействии неблагоприятных атмосферных факторов;
- сокращение при передаче одинаковой мощности в 1,5–2 раза площади земельных угодий, отчуждаемых под воздушные линии;
- управление величиной и направлением потоков мощности в электрических сетях.

Создание компактных ВЛ должно обеспечить экономичную и надежную передачу электрической энергии заданной мощности как между системами, так и внутри энергосистем. Применение компактных линий электропередачи способствует выполнению требований Федерального закона РФ от 23 ноября 2009 года № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности...».

На компактных ВЛ, в том числе УСВЛ, используются:

- конструкции опор, исключающие наличие заземленных элементов между фазами (в частности, опоры охватывающего типа);
- изолирующие траверсы;
- специальные виды подвесок проводов на опорах, например с помощью V-образных гирлянд изоляторов;
- изоляционные межфазовые элементы (изоляционные распорки), обеспечивающие механическую устойчивость сближенных фаз в пролетах.

УСВЛ имеют существенные преимущества при проведении ремонтных

работ. В режиме  $\theta=0^\circ$  пара сближенных фаз может рассматриваться как одна фаза с глубоким расщеплением. Расстояния от одной пары фаз ВЛ до другой и до заземленных элементов опор на УСВЛ выдерживаются такими же, как на ВЛ традиционной конструкции. Ремонт каждой пары сближенных фаз под напряжением может проводиться с использованием всех приемов и процедур, применяемых при выполнении ремонтных работ под напряжением на традиционных ВЛ с расщепленными фазами.

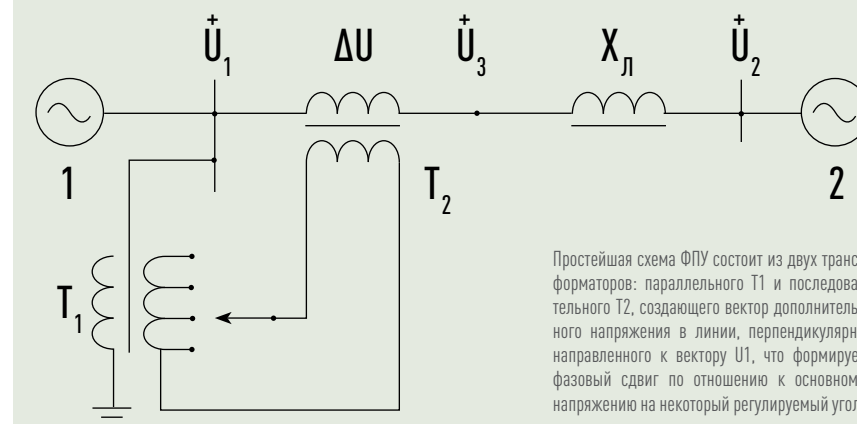
При  $\theta=120^\circ$  в случае производства ремонтных работ под напряжением УСВЛ должна быть переведена в режим  $\theta=0^\circ$ .

При необходимости отключения фазы одной из цепей УСВЛ в режиме  $\theta=120^\circ$  ряд работ может быть выполнен без отключения второй фазы, но большинство работ требуют отключения пары сближенных фаз, принадлежащих разным цепям. Причем оставшиеся под напряжением две пары фаз обеспечат четырехфазный режим УСВЛ. Выполнение ремонтных работ на отключенной паре фаз может проводиться аналогично работам на отключенной ВЛ при соблюдении соответствующих мер безопасности, так как остальные 4 фазы УСВЛ будут под напряжением.

Преимущества УСВЛ при выполнении ремонтных работ под напряжением необходимо принимать во внимание при технико-экономических обоснованиях выбора того или иного типа ВЛ.

Применение ФПУ на УСВЛ совместно с другими устройствами FACTS обеспечивает заданные параметры ВЛ, высокую управляемость электрических сетей и позволяет достичь существенной экономии капитальных и эксплуатационных затрат по энергосистеме в целом по сравнению с вариантами традиционных решений.

## СХЕМА ФПУ



Простейшая схема ФПУ состоит из двух трансформаторов: параллельного T1 и последовательного T2, создающего вектор дополнительного напряжения в линии, перпендикулярно направленного к вектору U1, что формирует фазовый сдвиг по отношению к основному напряжению на некоторый регулируемый угол.

В заключение следует отметить, что выполненные к настоящему времени технические и проектные проработки, а также накопленный опыт позволяют сделать вывод об экономической целесообразности применения компактных управляемых ВЛ, в том числе управляемых самокомпенсирующихся, оснащенных фазорегулирующими устройствами, для увеличения пропускной способности и управления потоками мощности в соответствии с заданными режимами.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Тимашова Л. В., Шакарян Ю. Г., Карева С. Н., Постолатий В. М., Быкова Е. В., Суслов В. М. Применение компактных ВЛ с фазорегулирующими устройствами для увеличения пропускной способности и управления потоками мощности в электроэнергетических системах / Сборник трудов шестой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов». – Благовещенск. Шакарян Ю. Г., Тимашова Л. В., Карева С. Н., Постолатий В. М., Быкова Е. В., Суслов В. М. Технические
- 2.

аспекты создания компактных управляемых ВЛ 220 и 500 кВ // Энерго-энергия. Передача и распределение, 2012, № 3 (12).

3. Дементьев Ю. А., Горюшин Ю. А., Шакарян Ю. Г., Тимашова Л. В., Постолатий В. М., Быкова Е. В., Бобылева Н. В. Эффективные средства транспорта электроэнергии // Воздушные линии, 2012, № 1 (6).
4. Постолатий В. М., Быкова Е. В., Суслов В. М., Шакарян Ю. Г., Тимашова Л. В., Карева С. Н. Методические подходы к выбору вариантов линий электропередач нового поколения на примере ВЛ-220 кВ // Problemele Energeticii Regionale, Chişinău, 2010, № 2 (13).
5. Постолатий В. М., Быкова Е. В. Эффективность применения управляемых высоковольтных линий электропередачи и фазорегулирующих устройств трансформаторного типа // Электричество, 2010, № 2. – с. 7–14.
6. Астахов Ю. Н., Постолатий В. М., Комендант И. Т., Чальый Г. В. Управляемые линии электропередачи / Под ред. В. А. Венникова. – Кишинев: «Штиинца», 1984.
7. Астахов Ю. Н., Венников В. А., Постолатий В. М. и др. Основные принципы создания и технические характеристики управляемых самокомпенсирующихся линий электропередачи // Электричество, 1977, № 12.