

# ТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СОЗДАНИЯ И РЕЖИМНЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ КОМПАКТНЫХ УПРАВЛЯЕМЫХ ВЛ 220, 500 кВ

АВТОРЫ:

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

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

КАРЕВА С. Н.  
ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

ПОСТОЛАТИЙ В. М.,  
Д. Т. Н.  
ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ  
АКАДЕМИИ НАУК  
МОЛДОВЫ

**Н**а современном этапе развития электроэнергетических систем и с учетом их перспектив все более актуальными становятся вопросы создания новых эффективных средств передачи и распределения электроэнергии, а также управления режимами энергосистем, обеспечивающих повышение пропускной способности ВЛ,

повышение управляемости ВЛ и энергосистем в целом, уменьшение площадей, отчуждаемых под строительство линий электропередачи, и выполнение всех требований по ограничению экологического влияния ВЛ и энергетического оборудования, повышение технико-экономических показателей передачи электрической энергии.



Воздушные линии нового поколения предусматривают создание компактных конфигураций ВЛ с минимально допустимыми расстояниями между фазами; выбор оптимальной конструкции расщепленной фазы и применение опор новых типов

Одним из способов достижения этих целей является применение в энергосистемах компактных управляемых ВЛ повышенной пропускной способности, оснащенных современными устройствами регулирования параметров, в том числе средствами фазового управления и продольно-поперечной компенсации.

Особенность электроэнергетической системы России состоит в значительных протяженностях электрических сетей, что создает дополнительные сложности в управлении режимами энергосистемы и обеспечении достаточной устойчивости работы внутрисистемных и межсистемных электрических связей. Одной из проблем Единой национальной электрической сети 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. Раздельная работа энергообъединений является существенным недостатком на фоне международных тенденций по дальнейшему развитию и интеграции объединенных энергетических систем на региональном, государственном и международном уровнях.

В этих условиях 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.

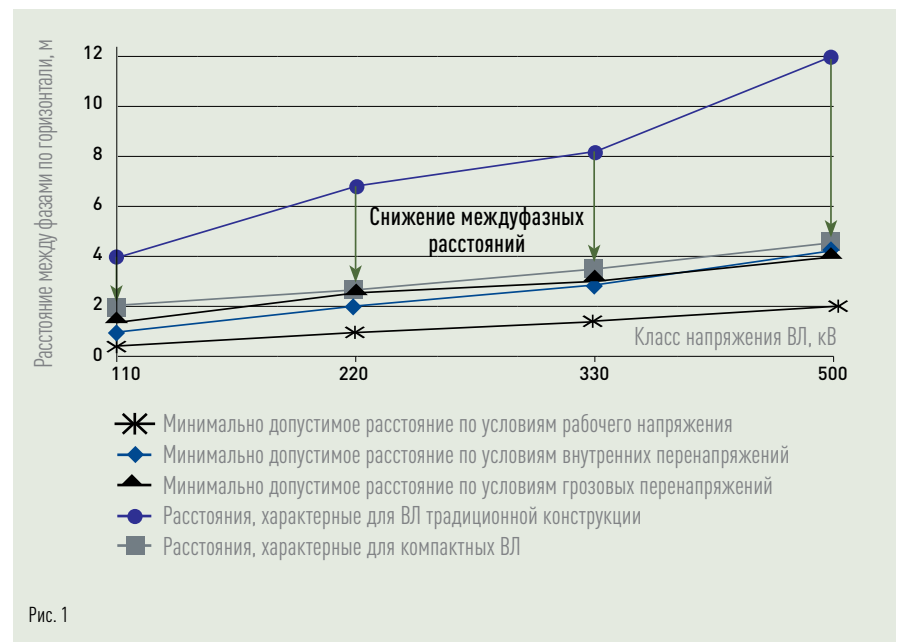


Рис. 1

## ОСНОВНЫЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ КОМПАКТНЫХ УПРАВЛЯЕМЫХ ВЛ И УПРАВЛЯЕМЫХ САМОКОМПЕНСИРУЮЩИХСЯ ВЛ (УСВЛ)

Компактизация ВЛ достигается за счет снижения расстояний между фазами до минимально допустимых по диэлектрической прочности воздушных промежутков «фаза-фаза» при рабочих напряжениях, а также при внутренних и грозовых перенапряжениях (рис. 1). При сокращении междофазных расстояний происходит усиление электромагнитной связи фаз, что приводит к уменьшению индуктивного сопротивления, повышению зарядной мощности и, как следствие, к снижению волнового сопротивления и увеличению натуральной мощности ВЛ (рис. 2).

Выбор расположения и конструкции фаз одноцепных и многоцепных компактных управляемых ВЛ обу-

словлен необходимостью улучшения электрических параметров линий за счет изменения параметров электромагнитного поля в междофазном и окружающем линию пространстве. Усиление электромагнитного поля внутри линии за счет сближения фаз позволяет увеличить пропускную способность и улучшить электрические и технические параметры ВЛ. Ослабление электромагнитного поля во внешнем пространстве приводит к улучшению экологической обстановки вдоль трассы ВЛ. Конструкции ВЛ нового поколения повышают их пропускную способность, а значит, экономические и экологические показатели.

Для осуществления компактного расположения фаз должны быть использованы специальные опоры, не имеющие заземленных элементов между фазами, применяются специальные виды подвесок проводов на опорах, например, с помощью V-образных гирлянд изоляторов или изоляционных траверс. Для обеспечения механической устойчивости сближенных фаз в пролетах могут быть использованы изоляционные распорки.



Рис. 2

Компактные двухцепные ВЛ могут быть выполнены таким образом, чтобы осуществлялось 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 позволяют регулировать параметры электрического и магнитного поля фаз и цепей, что обеспечивает управление эквивалентными параметрами ВЛ и величиной передаваемой мощности. Регулирование параметров ВЛ позволяет обеспечить заданные режимы как линии, так и энергосистемы в целом. Такое регулирование осуществляется путем изменения угла  $\theta$  сдвига системы векторов напряжений одной цепи по отношению к системе векторов напряжений другой цепи в пределах  $\theta = (0-180^\circ)$  с помощью фазопоротных устройств (ФПУ, ФРТ), установленных на подстанциях.

Главное отличие УСВЛ от компактных управляемых ВЛ состоит в том, что у УСВЛ попарно сближенными приняты фазы разных цепей. В процессе работы у УСВЛ предусматривается изменение (регулирование) угла сдвига между векторами напряжений цепей  $\theta$  от  $0^\circ$  до  $120^\circ$  (или до  $180^\circ$ ) в зависимости от величины передаваемой мощности и требуемых параметров режимов электропередачи. При угловом сдвиге между системами напряжений цепей  $\theta = 0^\circ$  УСВЛ обладает минимальной пропускной способностью, а при  $\theta = 120^\circ$  ( $180^\circ$ ) – максимальной, превосходящей обычные ВЛ в 1,3–1,6 раза.

Регулирование угла  $\theta$  может быть плавным или дискретным (рис. 3). Для плавного регулирования требуется установка фазопоротных устройств (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 при  $\theta = 0^\circ$  или при  $\theta = 120^\circ$ . Такое регулирование можно

осуществить путем соответствующего переключения фаз на подстанциях.

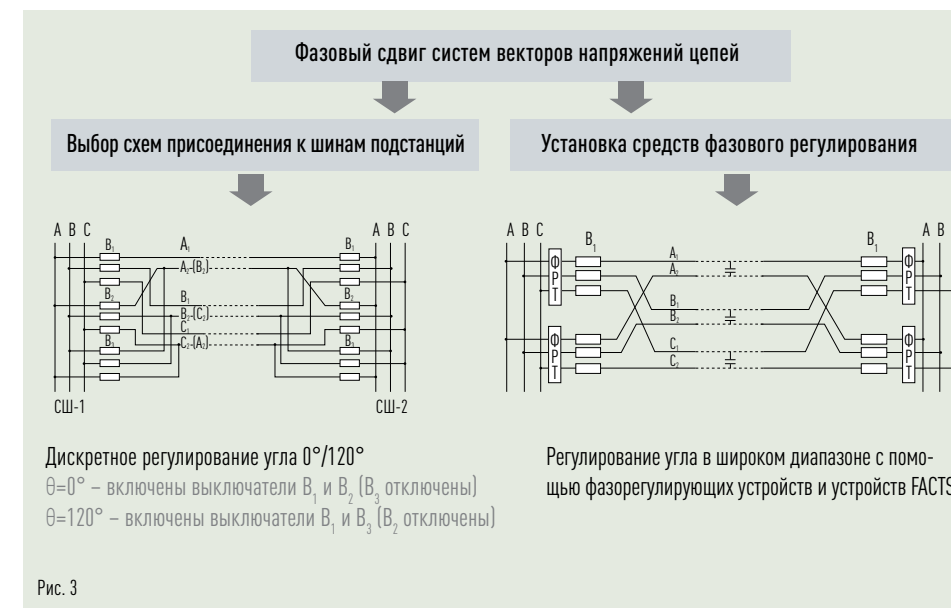
Применение ФПУ (ФРТ) на УСВЛ совместно с другими устройствами FACTS обеспечивает заданные параметры ВЛ, высокую управляемость электрических сетей и позволяет достичь существенной экономии капитальных и эксплуатационных затрат по энергосистеме в целом в сравнении с традиционными вариантами решений.

Эффективность применения компактных управляемых ВЛ рассмотрена на примере двухцепной ВЛ 220 кВ Майя–Томмот длиной 427 км, сооружение которой намечено в энергосистеме Якутии. Эта ВЛ позволит объединить изолированно работающий Центральный энергорайон Якутской энергосистемы и ОЭС Востока, что обеспечит надежное энергоснабжение строящейся Амуро-Якутской железнодорожной магистрали и новых горнорудных предприятий, которые предполагается разместить вдоль нее.

Для данного энергообъекта были рассмотрены два варианта конструкции ВЛ:

- двухцепная ВЛ 220 кВ традиционной конструкции натуральной мощностью 305 МВт, оснащенная устройствами компенсации;
- двухцепная УСВЛ 220 кВ при значении угла сдвига фаз векторов напряжений цепей  $\theta = 120^\circ$  с конструкцией фазы  $2 \times AC-300/39$  натуральной мощностью свыше 524 МВт с расположением фаз типа «дельта» (рис. 4).

Проведенные расчеты показали, что для ВЛ 220 кВ Майя–Томмот вариант сооружения двухцепной УСВЛ 220 кВ при передаваемой мощности свыше 300 МВт при принятой ставке дис-



континирования 10% по критерию минимума суммарных дисконтированных затрат является более эффективным по сравнению с вариантом сооружения двухцепной ВЛ в традиционном исполнении (рис. 5). При снижении передаваемой мощности ниже 300 МВт эффективнее становится вариант традиционных ВЛ. Уровень затрат на компенсацию потерь в энергосистеме при количестве часов использования максимума нагрузки в год, равном 5000, при применении ВЛ традиционной конструкции значительно выше (приблизительно в 2 раза), чем при применении компактной ВЛ или УСВЛ.

## ПРИМЕНЕНИЕ ФАЗОВОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Для компактных ВЛ целесообразно и эффективно применение современных устройств регулирования параметров режимов, средств фазорегулирующего управления (ФРУ) и продольно-поперечной компенсации.

Одним из наиболее эффективных способов регулирования является

фазовое управление, позволяющее осуществить:

- перераспределение величин потоков активной мощности между параллельно соединенными линиями электропередачи одного или разных классов напряжения, с возможностью загрузки одной из них до оптимального по режимным условиям значения;
- оптимизацию режимов электрической сети;
- повышение статической и динамической устойчивости энергосистем;
- регулирование потоков мощности в сложной энергосистеме с целью поддержания заданных уровней напряжений в узлах и обеспечения режимов минимальных потерь в энергосистеме;
- ограничение или увеличение величин передаваемой по межсистемным высоковольтным связям мощности исходя из режимных или коммерческих условий.

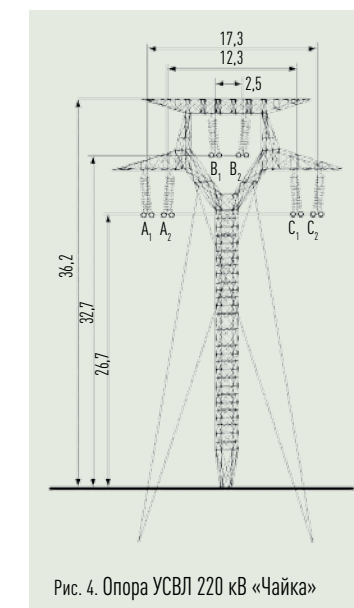


Рис. 4. Опора УСВЛ 220 кВ «Чайка»

Для практического осуществления фазового управления в энергосистемах необходимо применение специальных регулирующих устройств трансформаторного типа (ФРТ) или комбинированного типа с применением различных средств и систем силовой электроники.

Обоснование применения фазового управления (регулирования) в энергосистемах должно базироваться на том или ином требовании системного характера, а его эффективность – оцениваться по общепринятым экономическим показателям. На ФРУ не возлагается задача увеличения пропускной способности отдельных высоковольтных линий. Однако за счет соответствующей (оптимальной) загрузки всех линий в рассматриваемом сечении применение ФРУ может рассматриваться как эффективное средство повышения пропускной способности сечений энергосистем.

На примере реальной энергосистемы рассмотрим эффективность применения фазового управления величинами потоков мощности. В качестве рассматриваемого региона выбраны сети 500 кВ в сечении, по которому в настоящее время осуществляются

## СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТОВ ВЛ «МАЙЯ-ТОММОТ»

Структура дисконтированных затрат

Суммарные дисконтированные затраты

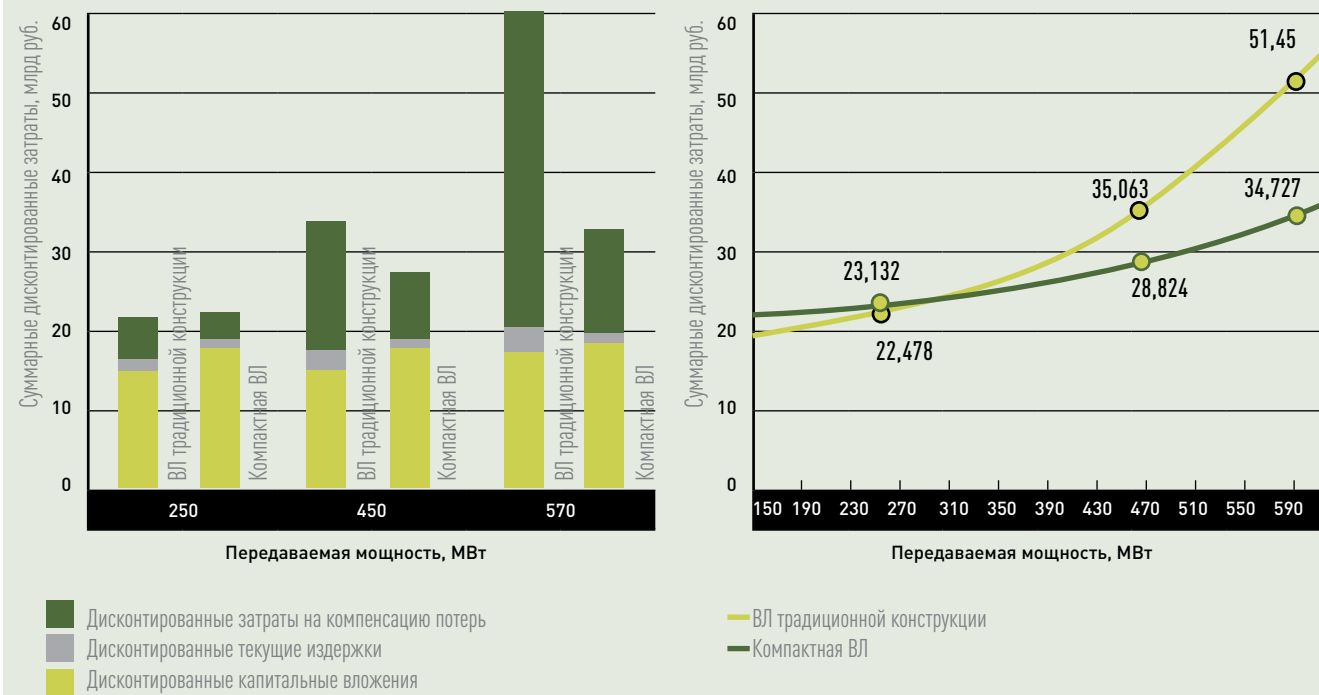


Рис. 5

обменные перетоки мощности между энергообъединениями Сибири и Урала. Основные ВЛ 220–500 кВ рассматриваемого сечения объединенной энергосистемы показаны на рис. 6.

Были выполнены расчеты режимов объединенной энергосистемы с учетом перспектив развития сетей 500 кВ в указанном регионе, в частности при введении в эксплуатацию новой ВЛ 500 кВ «Восход»–«Витязь» (Ишим) –Курган.

Были рассчитаны варианты применения одноцепной ВЛ 500 кВ в традиционном исполнении и компактной одноцепной ВЛ 500 кВ. Результаты этих расчетов для режима передачи максимальных потоков мощности из ОЭС Сибири в ОЭС Урала показаны на рис. 7.

Рассмотрены варианты без применения фазового управления и с его применением. В качестве ветви 500 кВ энергосистемы для фазового управления была выбрана проектируемая ВЛ 500 кВ «Восход»–«Витязь» (Ишим) с установкой ФРУ в начале указанной ВЛ, т. е. вблизи узла «Восход».

В варианте с фазовым управлением рассматривались режимы при изменении угла сдвига выходного напряжения относительно входного на ФРТ  $\delta_{ФРТ} = \pm 60^\circ$ . Режим при  $\delta_{ФРТ} = 0^\circ$  соответствовал варианту и условиям отсутствия ФРТ.

Как можно видеть из приведенных на рис. 7 данных, естественное распределение потоков мощности из ОЭС Сибири в ОЭС Урала

(при  $\delta_{ФРТ} = 0^\circ$ ) составляет 997 МВт, в том числе 352 МВт по ВЛ 500 кВ «Восход»–«Витязь» (Ишим). Остальная величина мощности в размере 645 МВт передается по сетям 500 кВ ОЭС Сибири и Казахстана, в том числе по ВЛ 500 кВ Кустанай (Казахстан) – Челябинская (Урал).

При введении с помощью ФРТ углового сдвига  $\delta_{ФРТ} = \pm 60^\circ$  наблюдается сильная зависимость изменения величин передаваемой мощности по рассматриваемым ветвям.

При значении угла, близком к значению  $\delta_{ФРТ} = -30^\circ$ , переток мощности по ВЛ 500 кВ Кустанай (Казахстан) – Челябинская (Урал) становится равным 0, что может рассматриваться как режим, при котором данная ВЛ отключена, а вся мощность из ОЭС

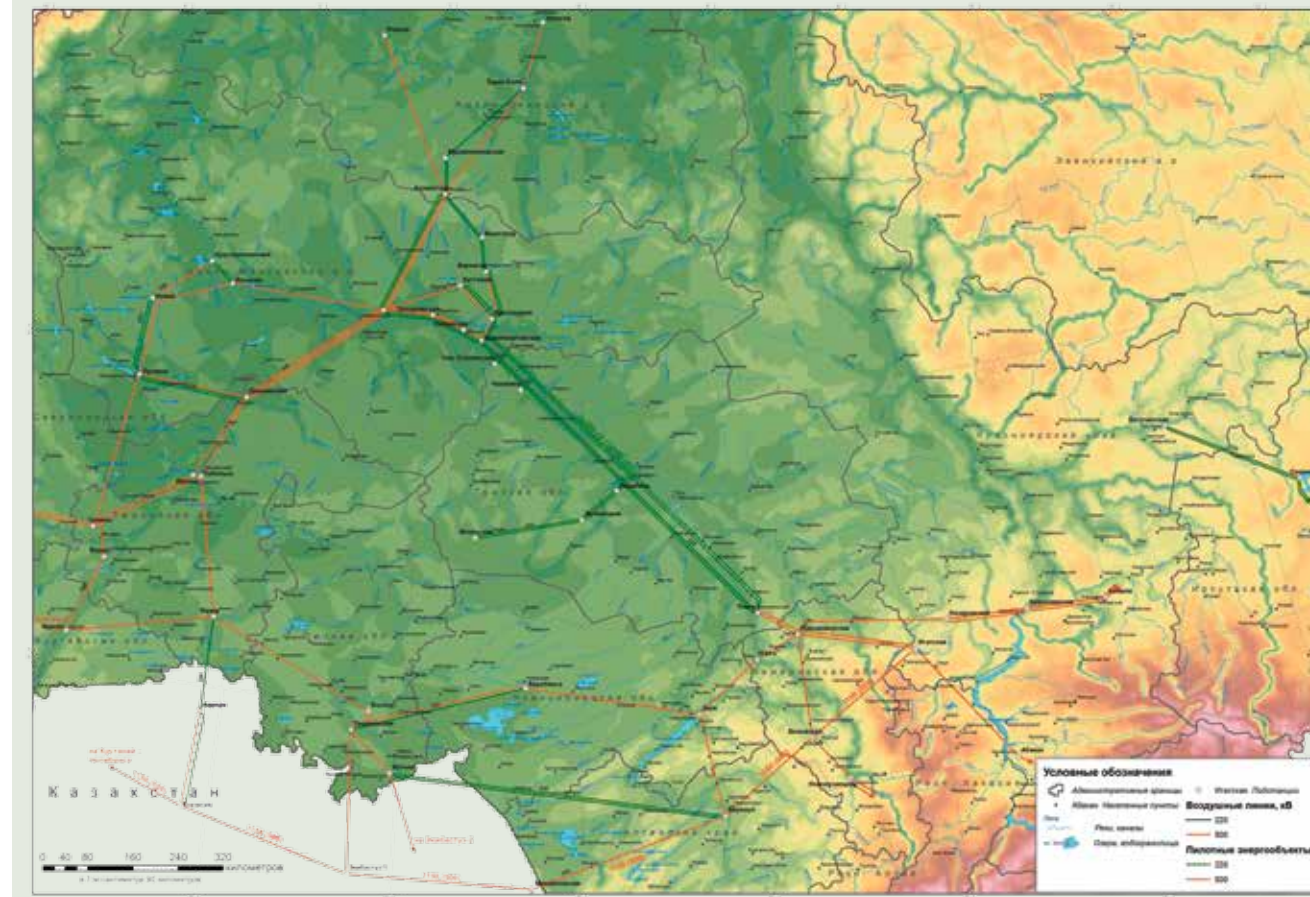


Рис. 6

Сибири в ОЭС Урала передается по ВЛ 500 кВ, расположенным на территории России.

При этом поток мощности по ВЛ 500 кВ «Восход»–«Витязь» (Ишим) (при  $\delta_{ФРТ} = -30^\circ$ ) составляет 974 МВт, что соответствует величине натуральной мощности данной одноцепной ВЛ при традиционном ее исполнении.

В случае дальнейшего роста передаваемой мощности (сверх 974 МВт) пропускной способности данной ВЛ недостаточно. В этом случае целесообразным является применение ВЛ 500 кВ «Восход»–«Витязь» (Ишим) – Курган в компактном исполнении, обеспечивающем величину натуральной мощности, равную 1480 МВт, или же путем

установки УПК соответствующей мощности в варианте обычной ВЛ 500 кВ. Указанную загрузку данной ВЛ до 1486 МВт можно осуществить путем введения угла  $\delta_{ФРТ} = -60^\circ$ .

Эффективность фазового регулирования при изменении  $\delta_{ФРТ}$  в пределах  $\pm 60^\circ$  определяется системными условиями.

Следует особо отметить, что при  $\delta_{ФРТ} = -60^\circ$  суммарный переток мощности из ОЭС Сибири в ОЭС Урала по ВЛ, расположенным на территории России, становится равным 1868 МВт вместо ранее указанного (997 МВт) при отсутствии фазового управления ( $\delta_{ФРТ} = 0^\circ$ ). При положительных значениях угла ( $\delta_{ФРТ}$ ) происходит уменьшение передаваемой мощности по ВЛ 500 кВ

«Восход»–«Витязь» (Ишим) в сторону ОЭС Урала. Так, при  $\delta_{ФРТ} = +15^\circ$  величина передаваемой по ней мощности становится равной 0 (рис. 7), а при  $\delta_{ФРТ} = +60^\circ$  передача мощности в размере 876 МВт будет происходить в обратную сторону, т. е. в сторону ОЭС Сибири.

## ПРИМЕНЕНИЕ КОМПАКТНЫХ УПРАВЛЯЕМЫХ ВЛ В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ

ВЛ с уменьшенными расстояниями между фазами (компактные линии) нашли широкое применение в мировой практике. Конструктивно

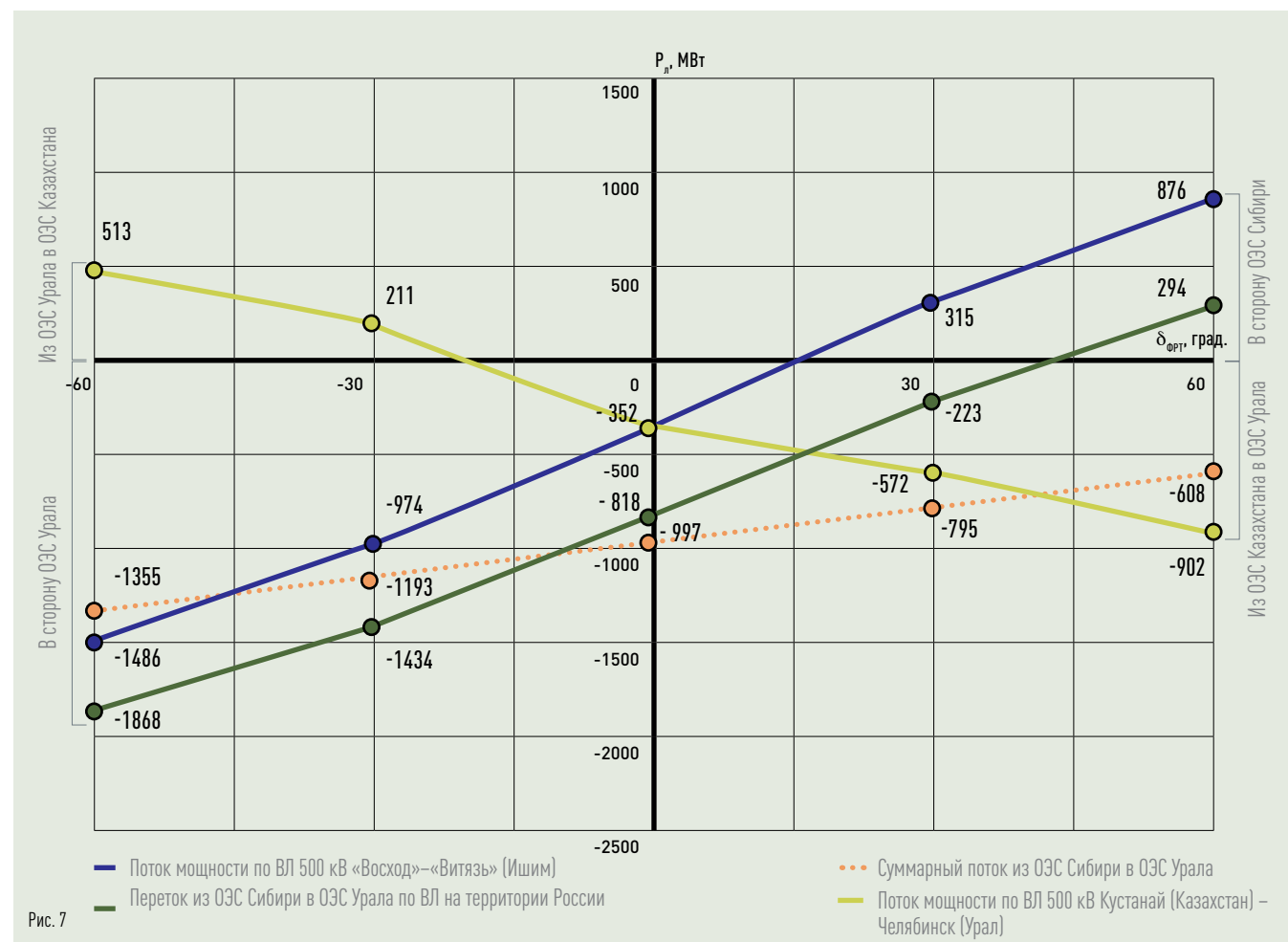


Рис. 7

компактные ВЛ выполняются как одноцепными, так и многоцепными одного класса напряжения, а также с расположением на одной опоре цепей различных классов напряжения.

В РФ и странах СНГ к настоящему времени выполнен большой объем расчетных предпроектных и проектных работ по созданию ряда ВЛ в компактном исполнении (одноцепном и двухцепном), в том числе двухцепных УСВЛ различных классов напряжения. Некоторые проекты уже нашли практическую реализацию в энергосистемах СНГ.

Так, в энергосистеме Молдовы уже более 30 лет успешно эксплуатиру-

ются одноцепные компактные ВЛ 10 кВ со сближенными фазами (общей протяженностью около 600 км) и двухцепная УСВЛ 110 кВ длиной 54 км, построенные по разработкам Института энергетики АН Молдовы и проектам молдавского института «Энергопроект».

В ЕЭС России с 1993 г. функционирует компактная ВЛ 330 кВ Псковская ГРЭС – Новосokolьники протяженностью 146,7 км.

До 1990 года были выполнены ТЭО ряда двухцепных УСВЛ 220 и 500 кВ. После 2000 года работы в области компактных ВЛ и УСВЛ были возобновлены и расширены.

На сегодняшний день были выполнены исследования возможности применения в ЕНЭС различных вариантов компактных управляемых ВЛ и УСВЛ 220 и 500 кВ. По результатам исследований показана техническая и экономическая эффективность строительства ряда компактных одноцепных и двухцепных, а также управляемых самокомпенсирующихся ВЛ напряжением 220, 500 кВ вместо традиционных ВЛ тех же классов напряжения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 транспорт электрической энергии в расчете на единицу передаваемой мощности за счет повышения пропускной способности электрической сети, эффективного использования устройств регулирования, сокращения площади отчуждаемых земель.

Компактные управляемые ВЛ (в том числе УСВЛ) по сравнению с ВЛ традиционной конструкции обеспечивают:

- увеличение пропускной способности в 1,2–1,6 раза;
- снижение суммарных затрат на 10–20% в расчете на единицу передаваемой мощности;
- осуществление в энергосистемах принудительного перераспределения потоков активной и реактивной мощности;
- уменьшение суммарной мощности и стоимости устройств регулирования реактивной мощности и напряжения;
- 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.

Компактные управляемые одноцепные и двухцепные ВЛ 500 кВ, в том числе двухцепные УСВЛ 500 кВ, могут быть также рекомендованы в качестве управляемых межсистемных связей для осуществления объединения на синхронную параллельную работу и других энергосистем, в частности ОЭС Сибири и Востока.

Результаты выполненных для конкретных энергообъектов исследований демонстрируют эффективность компактных ВЛ 220, 500 кВ большой пропускной способности как основы для создания интеллектуальных электроэнергетических систем. Применение компактных управляемых ВЛ совместно с фазорегулирующими устройствами и другими средствами управления позволяет решить ряд проблем при создании активно-адаптивных сетей для обеспечения бесперебойного электроснабжения потребителей.

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. 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). – с. 7–22.
2. Постолатий В. М., Быкова Е. В. Эффективность применения управляемых

## ИНФОРМАЦИЯ

### ФАЗОВОРОТНЫЕ УСТРОЙСТВА (ФПУ)

Специализированная модификация трансформатора, используемая для контроля полезной мощности трехфазных электрических сетей.

В случае использования ФПУ электроэнергия распределяется по линиям электропередачи пропорционально косинусу разности фазовых углов напряжения на входе и выходе линии.

3. Астахов Ю. Н., Постолатий В. М., Комендант И. Т., Чалый Г. В. Управляемые линии электропередачи / Под ред. В. А. Веникова. – Кишинев: «Штиинца», 1984. – 292 с.
4. Астахов Ю. Н., Веников В. А., Постолатий В. М. и др. Основные принципы создания и технические характеристики управляемых самокомпенсирующихся линий электропередачи // Электричество, 2010, № 2. – с. 7–14.
5. Барг И. Г., Эдельман В. И. Воздушные линии электропередачи. Вопросы эксплуатации и надежности. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 247 с.
6. Библия электрика. ПУЭ, МПОТ, ПТЭ. – 6-е и 7-е изд., все действующие разделы. – Новосибирск: Сиб. ун-в. из-во, 2011. – 688 с., илл.