

## ГК «ОПТЭН»

**Анализ докладов ИК-В2 «Воздушные линии», представленных  
на 44-й сессии СИГРЭ**



**Париж - Москва  
2012 год**

## 1. Введение

На церемонии открытия 44-й сессии СИГРЭ, состоявшейся 26 августа 2012 г. выступил Президент Государственной Сетевой Корпорации Китая Лью Зенья. Основная тема его выступления составляло представление идеи формирования межконтинентальных магистральных энергетических потоков, использование которых будет способствовать решению проблем оптимизации использования глобальных энергетических ресурсов. В процессе модернизации мировой энергетики предстоит решить ряд важнейших проблем.

Одной из первоочередных проблем является снижение зависимости энергетики от углеводородного сырья. Приоритетным является использование, так называемой, чистой энергии. Было отмечено, что за последние 10 лет объем генерации на базе использования энергии ветра возрос в 10 раз, а генерация с применением солнечной энергии возросла, за тот же период, в 20 раз.

Второй по значимости названа тенденция увеличения масштабов потребления электроэнергии на новых территориях, что приводит к заметному росту протяженности систем энергоснабжения. Электрические сети и газовые трубопроводы играют в развитии экономик всё более значительную роль.

Третьим по значимости процессом и тенденцией названы технические инновации в области преобразования энергии, а также в сфере широкого использования информационных технологий. Освоение технологии передачи электроэнергии на ультравысоком напряжении (УВН) открывают новые перспективы для передачи значительных мощностей на большие расстояния.

Значительное внимание в выступлении было уделено вопросам формирования межконтинентальных энергетических мостов, в основу создания которых должно быть положено, по мнению автора доклада, использование технологии строительства магистральных линий УВН (Рис.1.).



Рис. 1. Монтаж проводов на ВЛ УВН в Китае

Европа является в настоящее время одним из крупнейших центров потребления электрической энергии. По данным на 2011 г. потребление электроэнергии в Европе составило 23% от мирового уровня, т.е Европа занимает по уровню потребления второе место после азиатско-тихоокеанского региона, на долю которого приходится 39% от мирового энергопотребления. Европа активно развивает использование возобновляемых источников энергии, доля которых к рубежу 2020 г. должна составить 20%. После аварии на атомной станции Фукусима в Японии в ряде европейских стран (в Германии, Швейцарии и Италии) приняты решения о закрытии в течение ближайших 10 лет всех расположенных на территории этих государств атомных станций. Вследствие этого ожидаемая зависимость европейских

стран от импортируемых энергоресурсов возрастёт с 65% в 2020 г. до 70% в 2030 г. Прогноз общемирового потребления электроэнергии, приведенный автором доклада, показан на рис.2.

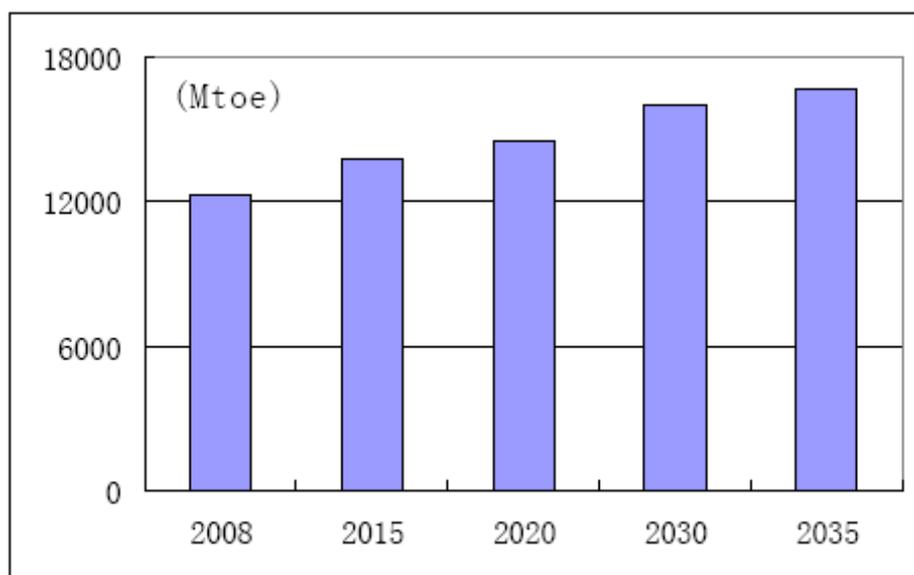


Рис.2. Тенденция роста общемирового потребления электроэнергии

Электропередачи УВН являются, по мнению автора доклада, безопасной экономичной и эффективной альтернативой покрытия ожидаемого дефицита энергетических мощностей в Европе. Так, например, линия постоянного тока  $\pm 800$  кВ может обеспечить передачу 8000 МВт на расстояние 2500 км при условии сохранения высоких экономических показателей. Для ВЛ постоянного тока  $\pm 1100$  кВ экономически эффективная передача энергии может осуществляться на расстояние до 5000 км.

Анализируя состояние энергетических ресурсов в граничащих с Европой странах следует отметить, что такие регионы, как Китай, российская Сибирь, страны СНГ и Монголия весьма богаты ресурсами ветровой, солнечной и гидравлической энергии, обладают весьма значительным потенциалом развития энергетики при относительно малых объёмах собственного потребления и низкой стоимости производства электроэнергии. Указанные регионы находятся в пределах 4000 – 8000 км от европейских стран и вполне доступны для организации электроснабжения с использованием технологий УВН и линий постоянного тока.

При этом предпочтительными источниками генерации электрической энергии называются экологически чистые и возобновляемые источники. На Рис.3, Рис.4 и Рис.5 приведены различные диаграммы и таблицы, дающие характеристику прогноза изменения соотношения используемых источников энергии в пользу «чистой энергии».

Одним из возможных вариантов доставки электроэнергии рассматривается перспектива создания энергомоста по территории Сибири до западных рубежей России по линиям постоянного тока  $\pm 1100$  кВ, далее до Германии по линиям  $\pm 800$  кВ. Общая протяженность подобного энергомоста может составить 6400 км, а передаваемая мощность – 6400 МВт. В случае же создания двухцепной линии УВН постоянного тока, передаваемая мощность может составить 22000 МВт. Причем в экономическом отношении создание подобного энергомоста выглядит более перспективным по сравнению с идеей создания на севере Германии комплекса ветроэнергетических установок.

В будущем в Европе может быть создана суперсеть на базе применения технологии УВН. Общая мощность подобной межконтинентальной структуры может составить 66 ТВт и при этом не будет использоваться ни атомная, ни углеводородная энергия.

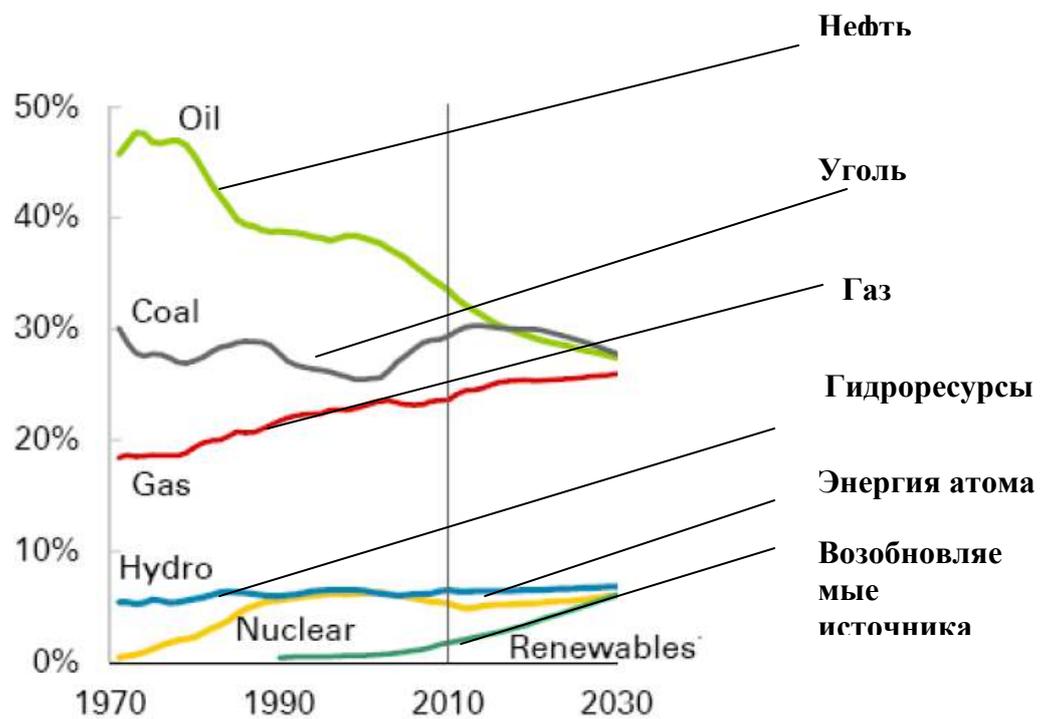


Рис. 3. Диаграмма, характеризующая прогноз изменения структуры генерирующих мощностей ха период с 1970 по 2030 г.г.



Рис. 4. Прогноз генерации как в целом, так и с применением только чистой энергии

Share of fuel 1990-2030 (% shares of world energy use)		1990	2030
	Renewables*	0.4	6.3
	Nuclear	5.6	6.0
	Hydroelectric	6.0	6.8
	Coal	27.3	27.7
	Natural gas	21.8	25.9
	Oil	38.9	27.2

Возобновляемые  
 источники  
 Атомная энергия  
 Гидроэнергия  
 Уголь  
 Газ  
 Нефть

Рис 5. Прогноз использования различных видов топлива и энергетических ресурсов

Применение новых технологий и новых прорывов в области создания новых материалов, способов накопления и хранения электрической энергии создаст, как предполагается благоприятные условия для передачи энергии из центральной Азии, Ближнего Востока и Северной Африки в Европу в значительных масштабах.

Приведенные в выступлении прогнозы и оценки создания трансконтинентальных линий электропередачи базируются на накопленном за последние годы КНР значительном опыте создания сети линий УВН переменного и постоянного тока. Схема действующих, строящихся и планируемых в Китае линий УВН переменного тока приведена на Рис.6.

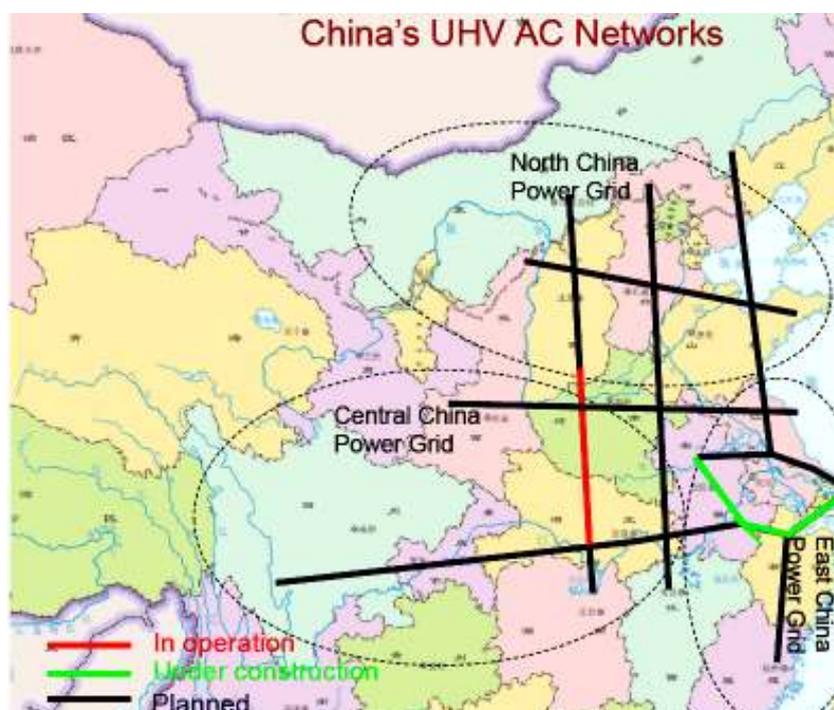


Рис. 6. Схема действующих  строящихся  и планируемых  в Китае ВЛ УВН переменного тока



Рис. 7. Трансконтинентальный энергомот Сибирь-Петербург-Берлин

В последние годы Государственная Сетевая Корпорация (ГСК) Китая ускорила шаги в направлении формирования благоприятных условий создания открытой для дальнейшего развития и высокоэффективной сети передачи и распределения энергии:

- Подготовлены к работе и запущены четыре испытательных базы (проблем УВН переменного тока, проблем УВН постоянного тока, проблем высокогорных объектов, проблем механики и инжиниринга), а также два центра исследования и проектирования (моделирования поведения больших сетевых объектов, проектирования линий постоянного тока). Благодаря принятым мерам были решены все проблемы организации изготовления высоковольтного оборудования для ВЛ УВН переменного и постоянного тока. К рубежу 2015 г. будет завершено создание ключевых элементов сети УВН переменного тока, связывающих наиболее крупные объекты генерации с центрами потребления энергии. Кроме того, будет завершено создание 15 крупных проектов создания линий постоянного тока, обеспечивающих перетоки энергии и мощности общим объёмом 260 ГВт в год.
- Другим прорывным направлением развития является формирование умных сетей. В сочетании с системами производства и накопления энергии ветра в объеме 50 000 МВт и солнечной энергии в объеме 2 500 МВт формируется пилотный комплекс производства, накопления и контролируемого распределения энергии. Уже установлены 92 650 000 умных измерительных систем, которые аккумулируют данные об электроснабжении 10 млн. потребителей. Планируется продолжить установку подобных контролируемых устройств в объеме 20 000 – 30 000 в год. В ряде провинций Китая установлены элементы умных сетей, включающие умные подстанции, накопители энергии, а также такие сетевые структуры, как электрические распределительные сети, телефония, ТВ и Интернет. Сформированы умные диспетчерские системы, включающие сетевой панорамный мониторинг, динамический анализ, и системы аварийного предупреждения, которые охватывают инфраструктурные элементы 220 кВ и выше в целях интегральной диспетчеризации.
- Третьим важным направлением деятельности ГСК явилось направление формирования технических стандартов. Сформированы стандарты, регламентирующие сети УВН и умных сетей. Создано 267 корпоративных стандарта. 39 отраслевых стандартов и 20 национальных стандартов. Процесс

формирования стандартов базировался на активном и продуктивном изучении и анализе международных стандартов. Китай особенно активно сотрудничает с МЭК и СИГРЭ в области формирования стандартов для объектов УВН. Активное сотрудничество с рядом международных организаций осуществляется также в области стандартизации умных сетей.

Успехи в создании протяженных ВЛ УВН постоянного и переменного тока в Китае создают, по мнению автора выступления, благоприятные перспективы для строительства магистрального энергетического моста, связывающего генерирующие мощности в Азии с объектами потребления в Центральной Европе (рис.7).

Как отмечено в выступлении, структуры СИГРЭ в течение последних десятилетий внесли значительный вклад в усиление связей между всеми участниками развития энергетических технологий и внедрения этих технологий в практику энергетического строительства. Всё это сформировало благоприятные условия для совместного решения вновь возникающих проблем, для дальнейшего продвижения тех успехов и достижений, которые демонстрирует глобальная энергетическая индустрия. Открываемая сессия СИГРЭ предоставляет благоприятные возможности для совместного преодоления тех проблем, которые актуальны для энергетического сектора мировой экономики. Мы рады способствовать развитию и активизации сотрудничества, которое открыто для всех собравшихся здесь членов сообщества.

## 2. ОБЗОР ДОКЛАДОВ, ПРЕДСТАВЛЕННЫХ НА 44-Й СЕССИИ ПО ТЕМАТИКЕ ИК-В2

На данной сессии было представлено 26 докладов (9 по первой предпочтительной теме, 13 – по второй и 4 по третьей).

2.1. Предпочтительная тема 1 была сформулирована следующим образом:

**Повышение эффективности использования линий электропередачи** и включала 4 направления

- Оптимизация существующих коридоров линий, включая применение проводов, произведенных по новым технологиям
- Преобразование линий переменного тока в линии постоянного тока
- Мониторинг состояния линий электропередачи, переход к режимам динамического рейтинга
- Совместное использование коридоров линий с другими заинтересованными субъектами

Дискуссионное заседание открыл председатель ИК-В2 Константин Папайлиоу, который представил информацию о современном состоянии комитета и об основных направлениях его деятельности, дал характеристику административной и технической стратегии, а также указал цели и задачи комитета на ближайшую перспективу. Давая характеристику тому кругу проблем, который охватывает первая предпочтительная тема, он отметил, что процесс согласования разрешительных документов для проектирования и строительства новых линий становится всё более сложным и продолжительным. Рост информированности широких масс в отношении экологического влияния ВЛ только усложняет этот процесс. В результате предприятия электрических сетей вынуждены предпринимать значительные усилия в поисках новых технологий и материалов, применение которых может способствовать более эффективному использованию коридоров существующих линий. Там же, где новые линии проектируются и сооружаются предпринимаются особые меры, направленные на улучшение баланса между ценовыми показателями и параметрами надежности этих объектов.

Известно несколько различных подходов к решению проблемы повышения эффективности использования существующих линий. Среди них такие, как перевод ВЛ на повышенное напряжение, применение высокотемпературных проводов с малыми стрелами провеса (ВПМС), применение систем мониторинга, работающих в режиме реального времени. Представленные по данной теме доклады дают достаточно широкий спектр данных о том, как сетевые компании решают подобные проблемы.

Далее дискуссией по предпочтительной теме 1 руководил Я.Дойл.

Доклад В2-101 (Канада) посвящен вопросам проектирования ВЛ  $\pm 500$  кВ постоянного тока и дает полное представление о тех технико-экономических решениях, которые были положены в основу принимаемых решений в отношении проектирования этого протяженного и стратегически важного объекта. Авторы доклада приводят доводы в пользу размещения этой линии протяженностью 1380 км в провинции Манитоба на существенном удалении от других уже существующих биполярных линий. Эти доводы основаны на результатах проведенных исследований по обеспечению надёжности и безопасности при эксплуатации рассматриваемого сетевого комплекса, включающего две уже существующие биполярные линии и третью – проектируемую, в целом. При проектировании третьей биполярной линии приняты в расчет ветровые и гололёдные нагрузки, период повторяемости которых составляет 150 лет. Данные технико-экономического сравнения стоимости строительства объекта в сопоставлении с ожидаемыми затратами на ликвидацию аварийных последствий, приведены для различных периодов повторяемости экстремальных внешних воздействии на рис.1. Авторы считают вполне обоснованным выбор периода повторяемости экстремальных ветровых и гололёдных нагрузок 150 лет. При этом достигается оптимальный баланс между первичными

капитальными затратами и ожидаемой стоимостью восстановления после серьёзной аварии, вызванной превышением внешних воздействий над расчётными значениями.

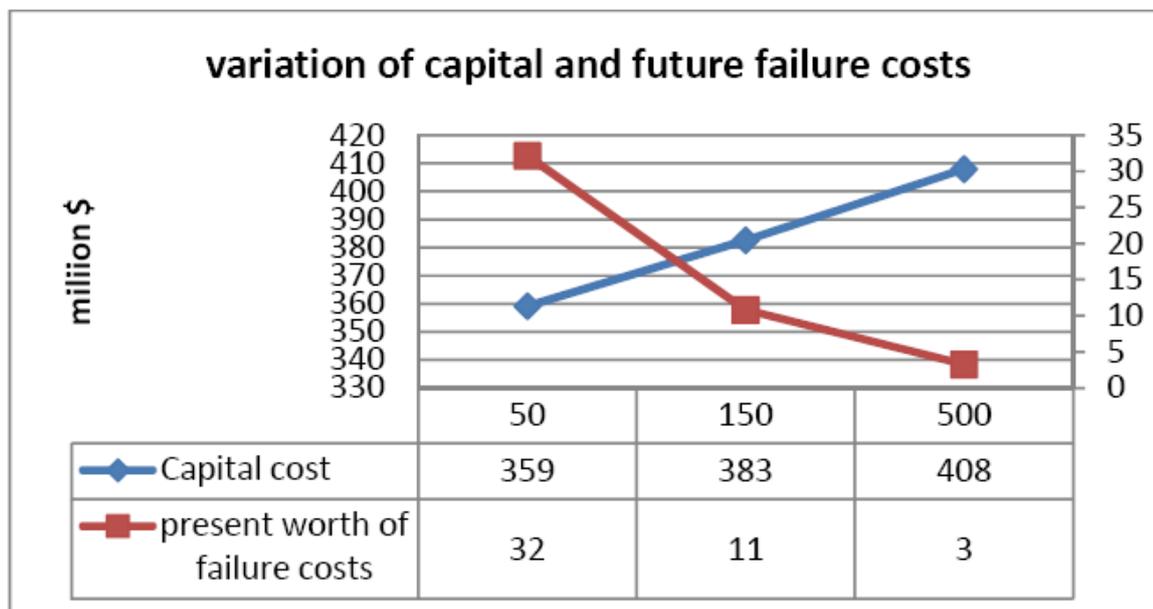


Рис. 1. Количественная оценка затрат на сооружение ВЛ (по вертикали слева) в млн. \$ и ожидаемые затраты на ликвидацию аварийных последствий (по вертикали справа) для различных вариантов принимаемых в расчёт периодов повторяемости экстремальных ветровых и гололёдных нагрузок (по горизонтали внизу)

В дискуссии по докладу обсуждалась обоснованность принятого канадцами решения о необходимости проектирования новой линии на существенном удалении от двух ранее построенных, тем более, что на стадии ТЭО были проведены все необходимые исследования климатических условий и рельефа по трассе рассматриваемой в докладе ВЛ.

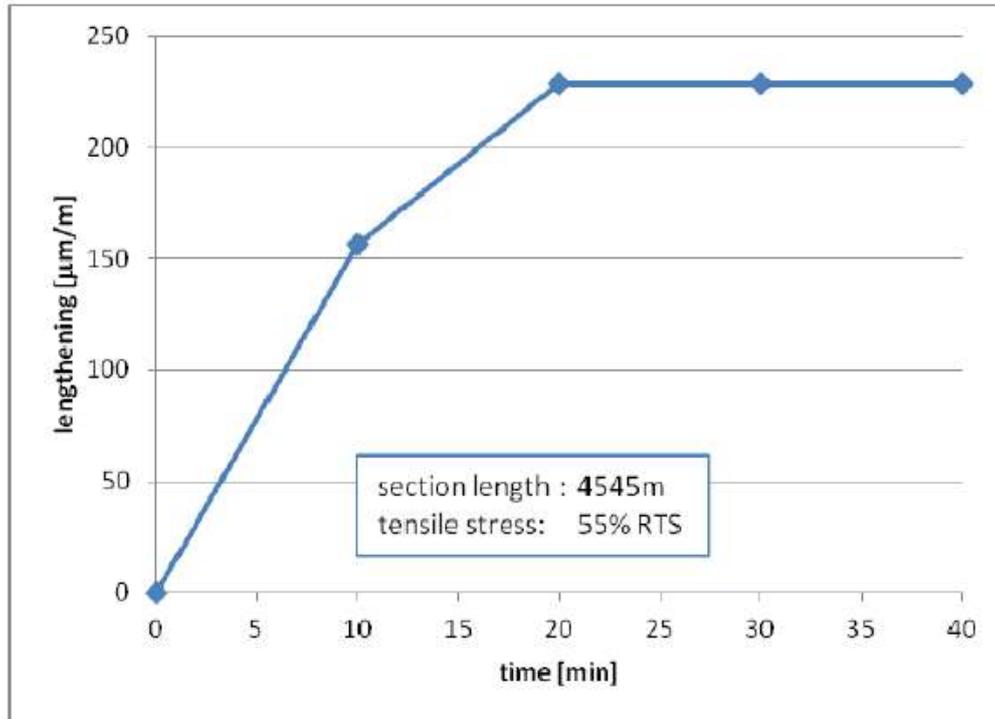
Авторы международного доклада В2-102 (Норвегия и Швеция) рассматривают результаты лабораторных исследований влияния загрязнений и гололёдных отложений на изоляторах существующих линий 300 кВ. Исследование предпринято в связи с необходимостью увеличения пропускной способности подобных линий, которое может быть достигнуто посредством перевода существующих ВЛ на повышенное напряжение 420 кВ. Исследования и лабораторные испытания показали, что уровень реальных загрязнений и гололёдных нагрузок выше принимавшегося в расчёт при проектировании системы ВЛ 300 кВ. Решением проблемы является замена существующих изоляторов на композитные, что позволит обеспечить приемлемую стойкость линейной изоляции рассматриваемых линий после перевода их на повышенное напряжение.

В дискуссии по докладу обсуждался вопрос о проблемах мониторинга загрязнений изоляторов ВЛ. Участники дискуссии пришли к выводу, что сетевые предприятия, планирующие перевод существующих ВЛ на повышенное напряжение, должны предусматривать проведение мероприятий по оценке и уточнению данных об уровнях загрязняющих воздействий.

Авторы доклада В2-103 (Австрия) рассматривают различные альтернативы повышения пропускной способности линий 220 кВ, проходящих по территории Тирольских Альп. В числе рассматриваемых упомянуты варианты перевода ВЛ на повышенное напряжение, замена существующих проводов на провода большего сечения и применение высокотемпературного провода. Предпочтение в решении проблемы повышения пропускной способности линии протяженностью 85 км со сроком службы 50 лет было отдано замене провода на

высокотемпературный компактный провод марки ZTACIR 341/109 проводящими проволоками из сплава алюминия с цирконием и сердечником из сплава ИНВАР (сталь с никелем), который отличается высокой прочностью, коррозионной стойкостью и малым коэффициентом температурного удлинения. Для того, чтобы обеспечить требуемые стрелы провела провода в ряде критических пролётов ВЛ была выполнена процедура престо́рессинга провода, которая состоит в том, что тяжение доводится до уровня 55% от предела прочности провода на разрыв и выдерживается на этом уровне в течение 20 мин. (рис. 2). В результате применения этой процедуры провод упрочняется и при последующих механических перегрузках, вызываемых интенсивным ветром и гололёдом не происходит удлинения провода и, соответственно, уменьшения габарита до земли.

#### Деформация растяжения



Время выдержки в нагруженном состоянии

Рис. 2. Диаграмма нагружения провода до уровня 55% от предела прочности

В дискуссии по докладу обсуждалась целесообразность и эффективность применения процедуры престо́рессинга провода для уменьшения вытяжки в процессе последующей эксплуатации. Высказывались опасения, что процедура перегрузки провода в процессе престо́рессинга может отрицательно влиять на состояние опор ВЛ, срок службы которой составляет 50 лет.

В докладе группы авторов из Ирландии (B2-104) рассматривается опыт применения высокотемпературного провода G(Z)TACSR на ВЛ 110 кВ и 220 кВ, целью которого является повышение пропускной способности существующей сети. Конструкция провода с зазором показана на рис. 3. От состоит из семипроволочного сердечника (оцинкованная сталь) и двух повивов проводящих проволок из сплава алюминия с цирконием, один из которых выполнен из профилированных проволок и формирует арочную структуру, обеспечивающую наличие зазора между сердечником и проводящими повивами. Зазор заполнен текстурной смазкой, усиливающей способность сердечника перемещаться в зазоре в продольном направлении. Благодаря этому всю нагрузку растяжения провода воспринимает только сердечник, а проволоки проводящих повивов не воспринимают этой нагрузки. Поскольку монтаж проводов с зазором производитель рекомендуют производить в анкерных секциях относительно малой протяженности, при установке проводов в существующих анкерных пролётах значительной длины монтировались временные промежуточные опоры.

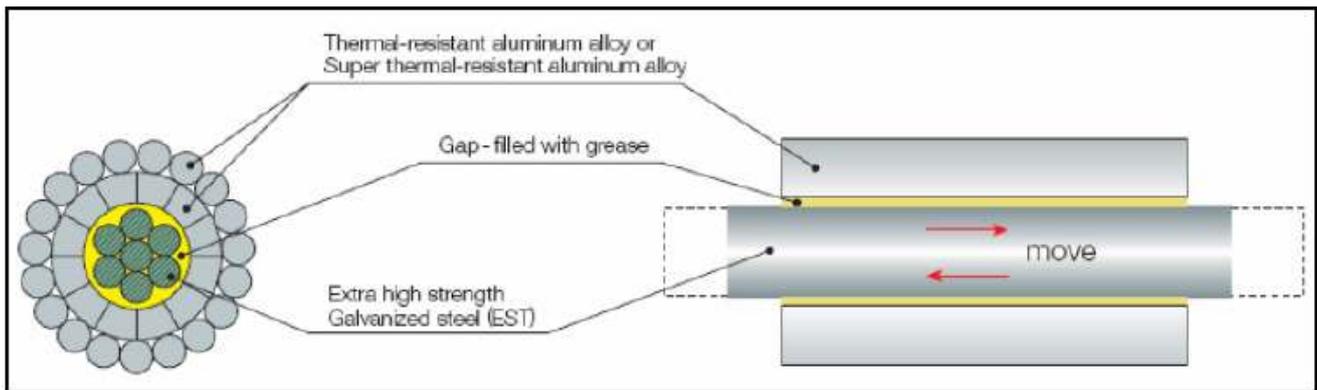


Рис.3. Конструкция провода с зазором между сердечником и термостойкими профилированными проволоками

В дискуссии по докладу был отмечен положительный опыт применения проводов с зазором, накопленный как в Японии, где они были разработаны и производятся, так и в ряде других стран Европы и Азии.

Тематика доклада В2-105, представленного группой специалистов по прикладной климатологии из Нидерландов, и обсуждавшегося вслед за ним доклада В2-106, подготовленного специалистами из Германии, имеет прямое отношение к проблемам максимального использования пропускной способности существующих линий электропередачи в режиме динамического рейтинга, т.е. посредством выбора режима работы линий электропередачи, в частности тока нагрузки, в зависимости от метеорологических условий, определяемых как в реальном времени, так и посредством использования данных метеорологического прогнозирования.

В Нидерландах достигнут достаточно высокий уровень надёжности прогнозирования температуры воздуха, скорости и направления ветра на период до двух суток. В соответствии с применяемой методикой метеомоделирования, скорость ветра оценивается для каждого пролёта ВЛ. Для оценки пропускной способности линии в целом за основу принимается ситуация в том из пролётов, где направление и скорость ветра наименее благоприятны для охлаждения проводов. Применяемая в настоящее время модель моделирования состояния ВЛ включает наряду с компонентами метеорологического моделирования, расчетную модель поведения проводов ВЛ и элементы выбора расчётным путём максимально допустимых токовых нагрузок. Для внедрения разработанной модели в практику эксплуатации ВЛ она 18 месяце проходила тестирование в режиме пилотного проекта

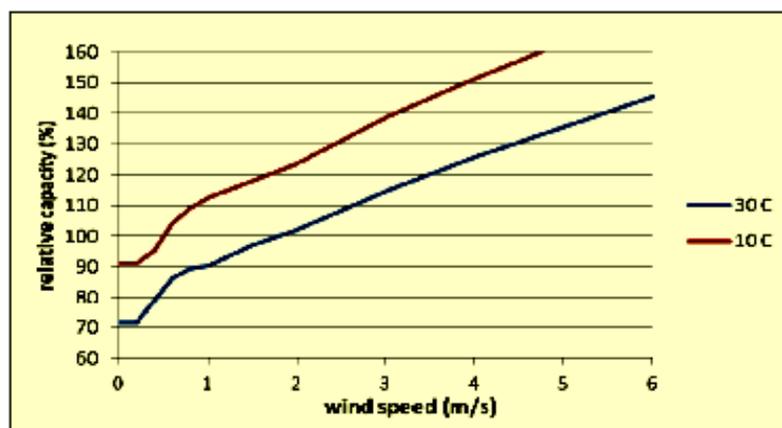


Рис. 4. Оценка максимально допустимой передаваемой мощности в % в зависимости от температуры воздуха ( — +3 C — +1 C) и скорости ветра

Полученные на основе применения данного метода моделирования расчетные значения допустимой пропускной способности (в % от номинального значения) приведены на рис. 4. Очевидно, что при скоростях поперечного ветра 5-6 м/с пропускная способность линии может быть увеличена на 40-50%. Тестирование модели динамического рейтинга ВЛ, основанной на использовании метеорологических данных, получаемых в режиме реального времени, а также дополняемых данными прогноза на 1-2 суток, подтвердило достаточно высокий уровень надежности основанных на подобном подходе решений. Такой способ повышения пропускной способности линий, в котором метеорологический прогноз эффективно дополняется данными анализа рельефа местности, оказывающего существенное влияние на скорость и направление ветра на локальных и особенно «критических» участках трасс, принят сетевой компанией в качестве действенного инструмента организации эксплуатации сети линий 110 и 220 кВ.

Как уже было отмечено авторы доклада В2-106 также посвятили его проблематике повышения пропускной способности ВЛ с использованием технологии динамического рейтинга. Для обоснования перспективности подобной технологии был проведен значительный по объёму и важности полученных результатов цикл испытаний на ВЛ 380 кВ. Температура проводов расщеплённой фазы 4хАС 240/40 определялась с применением ирёх различных методов:

- Посредством прямых измерений двумя датчиками, остановленными на разных фазах, высота крепления которых отличается на 3 м,
- Расчётным путём – по известной методике СИГРЭ, с использованием метеорологических параметров, полученных от метеостанции, установленной на опоре ВЛ (рис. 5),
- Расчётным путём с использованием доступных данных государственных метеорологических служб.

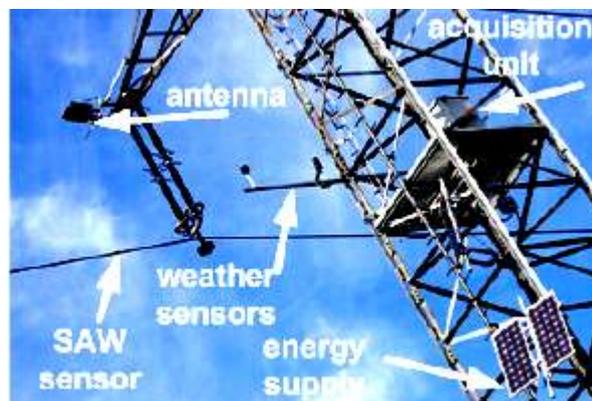


Рис.5. Метеостанция и датчик температуры провода, установленные на опоре и проводах ВЛ

Данные метеостанции, расположенной на уровне креплений проводов на опоре позволяют рассчитать температуру провода, отличающуюся от данных прямых измерений не более, чем на 5 К. Использование данных официальных метеослужб даёт большую погрешность при определении температуры провода из-за недостаточной точности в оценках скоростей и направлений ветра. Продолжительные наблюдения за состоянием ВЛ в различных метеорологических условиях (рис. 6) подтвердили эффективность применения технологии динамического рейтинга, позволяющего в зависимости от режимных и внешних условий поддерживать токовые нагрузки на уровне 3150 А (плотность тока 2,8 А/мм<sup>2</sup>), снижая их в худших условиях до 2580 А и повышая в наиболее благоприятных - до 4000А (3.6 А/мм<sup>2</sup>).

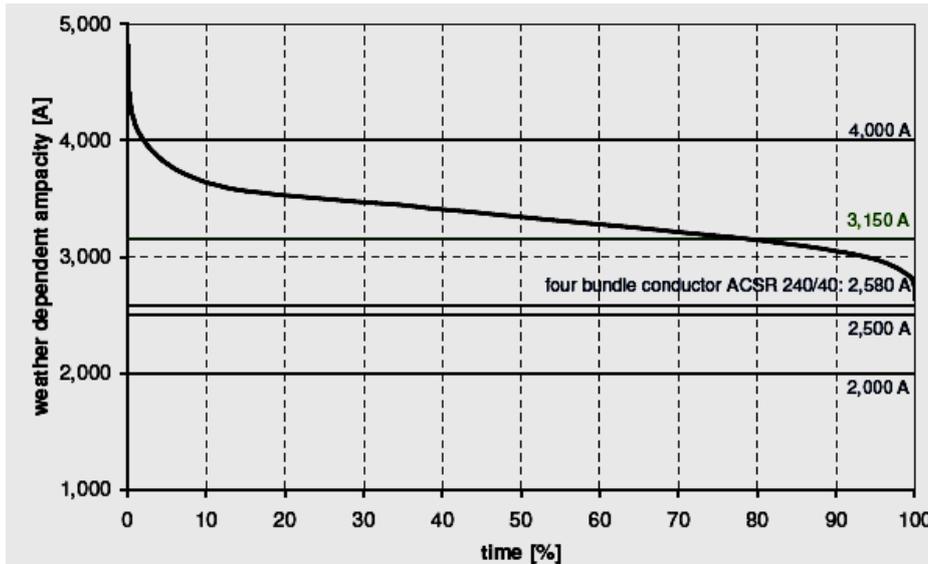


Рис. 6. Среднегодовая продолжительность максимально допустимых токовых нагрузок ВЛ 380 кВ

В докладе В2-107 (США, Канада) рассматриваются варианты перевода двух параллельно расположенных ВЛ переменного тока напряжением 287 кВ на постоянный ток. Расчетные оценки и прогнозы, приведенные в докладе, показывают, что ожидаемый эффект от реализации подобного проекта состоит в повышении пропускной способности реконструированной системы из двух линий в 1.3 раза.

Доклад В2-109 (Южная Корея) посвящен исследованию интенсивности электрического и магнитного полей гибридной системы, которая по проекту должна включать линию постоянного тока  $\pm 80$  кВ и размещаемые над ней цепи ВЛ 154 кВ переменного тока. Моделируются различные варианты формирования гибридной линии 154/80 кВ переменного и постоянного тока. Расчетные значения интенсивности электромагнитных воздействий на уровне земли предполагается проверить, организовав прямые измерения с помощью мобильных систем контроля экологических влияний.

Доклад В2-108 представителей США, Испании и Канады посвящен проблемам экспериментальной и теоретической оценки градиентов температуры проводов интенсивно нагруженных линий в радиальном и продольном направлениях. Утверждается, что разница температур в центре и на поверхности провода может составлять от  $10^0$  до  $30^0$  С. Однако при этом рассматриваются плотности тока 2.5 - 3 А/мм<sup>2</sup> для проводов сечением от 800 до 1330 мм<sup>2</sup>, что соответствует токовым нагрузкам 2 – 4 кА. Подобные токовые нагрузки маловероятны, что и было отмечено в дискуссии по данному докладу.

2.2. Вторая предпочтительная тема, оказавшаяся наиболее привлекательной, поскольку по ней было представлено наибольшее число докладов, была сформулирована следующим образом – **состояние ВЛ и способы его оценки** и включает подразделы

- Использование эксплуатационных данных для управления состоянием ВЛ,
- Средства и методы диагностики, применяемые для оценки надёжности и остаточного срока службы элементов ВЛ,
- Динамические и сейсмические процессы, влияние экстремальных метеорологических условий

Доклад В2-202, представленный группой специалистов по прикладной климатологии из Норвегии, Великобритании и Канады, посвящен обсуждению современных методов

метеорологического прогнозирования, которые могут быть использованы при проектировании линий электропередачи в малоизученных районах, где метеонаблюдения регулярно не проводятся. Вновь разработанный способ метеорологического моделирования основан на использовании данных сети регулярных метеостанций, радаров и метеорологических спутников. Этот способ прошёл практическую проверку при выполнении реальных проектов для малоизученных районов Норвегии, а также для оценки величин ветровых и гололёдных воздействий в Альпах на высотах от 400 до 800 м.

Доклад В2-203 подготовлен российскими специалистами из НИИПТа и описывает опыт применения управляемых выпрямительных систем для организации плавки гололёда и предотвращения тяжелых аварий в разных регионах РФ. Система предупреждения гололёдных аварий включает помимо датчиков гололёдных нагрузок, устройства автоматического управления, установленные на подстанциях. Особое внимание в докладе уделено вопросам плавки гололёда на оптических кабелях, встроенных в грозотрос (ОКГТ), для организации которой широкое применение нашли микроконтроллеры величины тока плавки. Для применения плавки гололёда на ОКГТ большое значение имеет также внедрение системы распределённого контроля температуры кабеля (СРКТ), разработанная специалистами ГК ОПТЭН. Применение этой системы особенно важно при плавке гололёда на протяженных участках ОКГТ, температура которого при плавке не должна превышать  $80^{\circ}\text{C}$ , а размеры и плотность гололёдных отложений на разных участках трассы могут изменяться в широком диапазоне. В дискуссии по докладу обсуждались вопросы согласования проблем организации плавки на токоведущих проводах с интересами потребителей электроэнергии, отключаемых на период проведения плавки гололёда.

В докладе В2-204 рассматриваются применяемые в Италии методы контроля состояния проводов и опор ВЛ в условиях налипания мокрого снега. Разработана система прогнозирования налипания мокрого снега на 72 часа. Точность прогноза контролируется лазерными и ультразвуковыми устройствами измерения интенсивности процесса налипания снега. Данные прогноза и контроля используются диспетчерскими службами для предотвращения аварийных отключений ВЛ. Кроме того, разработаны и проходят практическую проверку устройства (противовесы), установка которых на проводах (рис. 7) увеличивает их крутильную жесткость, способствуя ограничению налипания мокрого снега. Наблюдения, проводившиеся в зимний период 2010/2011, подтвердили эффективность противовесов в качестве средства ограничения налипания мокрого снега. В дискуссии по докладу обсуждался вопрос о поведении противовесов в условиях вибрации проводов. Отмечено, что применение спиральных протекторов в значительной мере снижает опасность повреждения провода в месте установки противовеса при вибрации.



Рис.7. Налипание мокрого снега на провод с противовесом и без него.

В докладе В2-205 (Израиль) рассматриваются проблемы перекрытий загрязненных изоляторов и влияние различных факторов, повышающих риск возникновения перекрытий. Рассматривается система мониторинга, позволяющая регистрировать электромагнитные импульсы, генерируемые частичными разрядами в зазорах между элементами гирлянд изоляторов. Беспроводные системы мониторинга интенсивности частичных разрядов представляются авторами доклада, как более эффективные, по сравнению с ранее применявшимися системами контроля состояния загрязненных изоляторов, базировавшиеся на регистрации токов утечки и интенсивности коронных разрядов на поверхности изоляторов. Даны оценки снижения риска аварийных отключений ВЛ в результате своевременного выполнения мероприятий по очистке загрязнённых изоляторов ВЛ 160 и 400 кВ.

Доклад В2-206 представляет результаты проведенных в Новой Зеландии испытаний (рис. 8) двух опор и фундаментов, доведенных до их разрушения, на предназначенной для реконструкции двухцепной ВЛ 110 кВ, срок службы которой составлял на момент испытаний 45 лет. Как показали испытания, уровень разрушающих нагрузок составил 120% от расчетного для опоры и 145% от расчетного уровня разрушающих нагрузок для фундамента (подножника) с ростверком.



Рис. 8. Разрушение опоры в результате воздействия испытательных нагрузок

В докладе В2-211 (США) также представлены результаты исследования причин разрушения опор нескольких линий различных классов напряжения (230 кВ, 345 кВ и 500 кВ), последовавших вследствие экстремальных ветровых и гололёдных воздействий. В результате проведенных исследований предложен новый метод оценки надежности опор, основанный на данных анализа качества их сооружения, и детального учета тех топографических особенностей местности, которые способствуют локальному увеличению риска разрушения опор. Применение предлагаемого авторами доклада метода позволяет выделить те опоры ВЛ, повреждение которых при экстремальных воздействиях является наиболее вероятным.

Доклад В2-207, представлен большой группой авторов из Австрии и включает данные климатологических исследований, предпринятых с целью построения пространственной модели распределения нисходящих воздушных потоков, достигающих экстремально высоких скоростей 208-274 км/час. Подобные нисходящие потоки (рис. 9), сопровождающие интенсивные циклоны, возникают достаточно редко и действуют в пределах относительно небольших территорий, но способны вызывать разрушительные воздействия (обрыв проводов,

разрушение опор ВЛ и различных строений, падение деревьев и проч.). В рамках проекта, направленного на изучение подобных процессов, разработана компьютерная модель, которая позволяет прогнозировать опасные последствия как нисходящих потоков, так и иных аэродинамических явлений, возникающих под влиянием рельефа местности на динамику воздушных потоков.

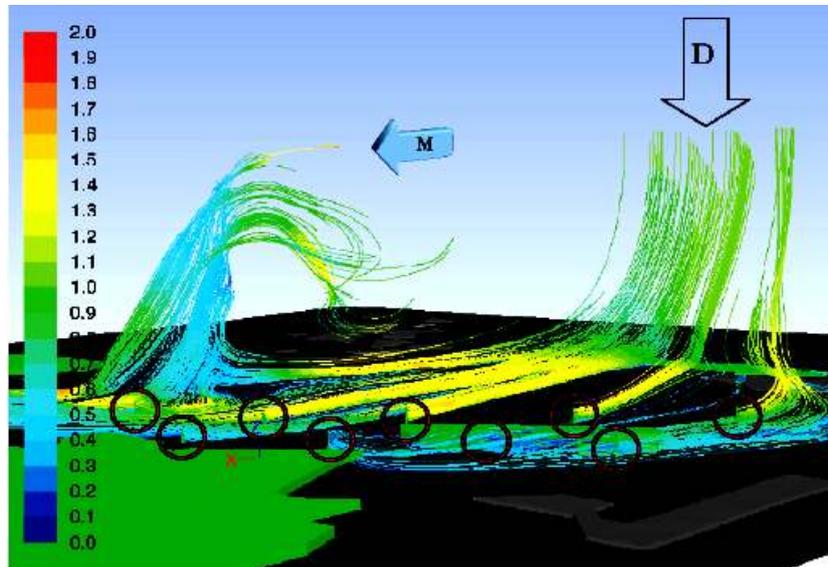


Рис.9. Модель нисходящего потока скоростью 208 км/час и крайне высоким уровнем турбулентности

В дискуссии по докладу были высказаны соображения о необходимости дальнейшей проверки достоверности предложенной модели рассматриваемых редких аэродинамических явлений и тех опасных последствий, которые прогнозируются при моделировании экстремальных явлений.

Доклад В2-208 (Бельгия) посвящен вопросам управления техническим состоянием электрических сетей, состоящих из воздушных и кабельных линий напряжением от 30 кВ до 380 кВ, осуществляемым национальным системным оператором Элиа. Срок службы воздушных линий уже достаточно велик, поскольку начало сетевого строительства относится к 1920 г., а пик строительных объёмов – к периоду 60-х и 70-х годов прошлого столетия. Для принятия решения об очерёдности обновления элементов сетевой инфраструктуры необходимо получить точное представление о техническом состоянии различных компонентов сетевого хозяйства. Для каждой ВЛ компания формирует карточку оценки технического состояния элементов куда заносятся данные, полученные про обходах и проведенном инструментальном контроле. На рис.10, а приведен пример выявленного процесса деградации опор, на рис. 10,б показано устройство контроля состояния цинкового покрытия сердечника АС провода.



Рис. 10. Примеры из базы данных о состоянии ВЛ: а – деградация опор, б – контроль состояния цинкового покрытия сердечника АС провода

Анализ данных обходов, осмотров, инструментального контроля, а также накопленной компанией базы данных о технологических нарушениях и повреждениях различных элементов ВЛ осуществляется с применением специально разработанных компанией программных продуктов, в результате чего формируются матрицы риска возникновения отказов различных объектов, принимаемые во внимание при решении вопросов о приоритетности ремонтов и реконструкции объектов сетевой инфраструктуры.

Доклад В2-209 (Украина) описывает проблемы, связанные с необходимостью уточнения гололёдно-ветровых нагрузок в приморской зоне полуострова Крым, где в зимний период 2009/2010 произошло каскадное разрушение 14 стальных решетчатых промежуточных опор ВЛ 330 кВ на участке общей протяженностью 9 км (рис. 11).



Рис.11. Повреждённая анкерная секция ВЛ 330 кВ «Каховская - Джанкой»

В процессе пляски расщеплённой фазы из дух проводов произошёл разрыв U-образного болта крепления гирлянды изоляторов к траверсе анкерно-угловой опоры, что послужило толчком к развитию каскадного разрушения 9 опор анкерного пролёта. Для предотвращения тяжелых последствий гололёдно-ветровых аварий ВЛ в южной части Украины принято решение о создании нескольких дополнительных метеорологических станций, что позволит сформировать пространственно-распределённую модель гололёдных и ветровых нагрузок особенно актуальную для районов Перекопского и Чонгарского перешейков.

В дискуссии по докладу среди специалистов по прикладной климатологии обсуждался вопрос о том, насколько близко к опасным зонам должны быть расположены метеорологические станции, чтобы получить достоверные данные об экстремальных гололёдных и ветровых нагрузках.

В докладе В2-210 представлены результаты исследований, выполненных китайскими специалистами с целью классификации различных видов пляски проводов и формирования карты частоты повторяемости и интенсивности пляски. Территория страны на этой карте разделена на 4 зоны (0, I, II, III). При проектировании линий электропередачи рекомендуется не планировать нового строительства в зонах наиболее часто повторяющейся и интенсивной пляски II и III. В тех же случаях, когда строительство новых линий в указанных зонах неизбежно, рекомендуется предусматривать при проектировании ВЛ уменьшенные длины промежуточных пролётов и малые стрелы провеса проводов.

В докладе В2-212, представленном четырьмя авторами из Бразилии, рассматриваются результаты исследования, выполненных в процессе проектирования большого воздушного перехода двухцепной ВЛ 500 кВ через р. Тромбетас. Конструкция перехода К-П-П-П-К общей протяженностью 5 100 м предусматривает установку трех промежуточных опор, две из

которых имеют высоту 190 м. и одна – 160 м. Исследовано воздействие на переходные опоры динамических нагрузок, которые могут возникнуть в случае обрыва одного или нескольких проводов, а также нагрузки от действия характерных для данного региона тропических штормов. В дискуссии по докладу внимание специалистов было привлечено к тому, что принятые авторами доклада в расчет составляющие динамических нагрузок при обрыве провода в 1.5 раза превышают продольную составляющую нагрузки на опору в статике, в то время, как в известных из мировой практики расчетах подобных объектов динамическая составляющая нагрузок принималась в 2 раза выше соответствующих статических воздействий.

Доклад В2-213 (Япония) посвящен проблеме снижения срока службы АС проводов в результате интенсивной коррозии, обусловленной высоким содержанием солей в воздушных потоках, воздействующих на ВЛ, проходящих в непосредственной близости от побережья Японского моря. Обсуждается вероятностный метод оценки остаточного срока службы проводов, подверженных коррозионным процессам различной интенсивности. На базе анализа ускоренных лабораторных испытаний и изучения 1500 взятых на приморских линиях образцов проводов составлена карта интенсивности влияния коррозионных процессов в зависимости от топографических особенностей местности, направления ветров и влияния экологических факторов.

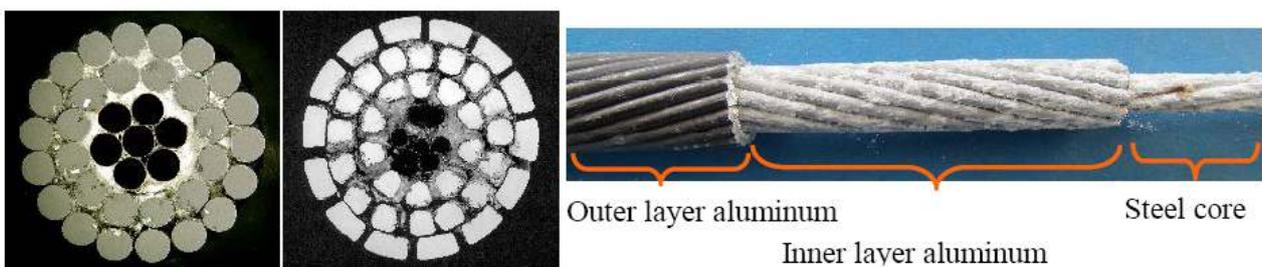


Рис. 12. Следы коррозии на алюминиевых проволоках внутреннего повива и на стальном сердечнике провода ВЛ, проходящей вблизи побережья Японского моря

Доклад В2-214 (Швейцария, Германия, Швеция, Италия) посвящен проблеме выявления дефектов композитных изоляторов. Применение композитных изоляторов, имеющие ряд преимуществ перед стеклянными и фарфоровыми (меньшая стоимость, простота установки, стойкость к загрязнениям), связано с проблемами выявления развивающихся дефектов до момента возникновения технологического нарушения, вызванного повреждением изолятора. В докладе рассматривается современное состояние данной проблемы перспективные способы оценки состояния изоляторов, применяемые как в лабораторных, так и в полевых условиях.

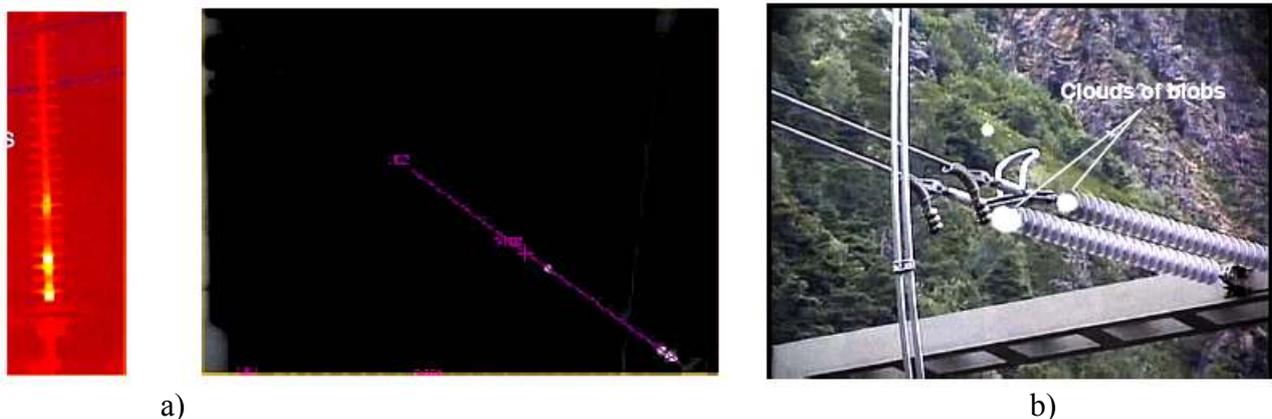


Рис. 13. Выявление внутренних дефектов изоляторов с помощью средств диагностики: а – инфракрасная камера, б – ультрафиолетовая камера

Приводятся примеры эффективного применения таких методов, как исследование состояния изоляторов в инфракрасном и ультрафиолетовом диапазоне излучения (рис. 13), а также другие методы, применение которых возможно на действующих линиях без снятия напряжения.

2.3. Третья предпочтительная тема ИК В2 на 44-й сессии сформулирована следующим образом - **обслуживание и реконструкция ВЛ:**

- Работы на действующих линиях без снятия напряжения, использование роботов и беспилотных летательных аппаратов (БПЛА)
- Использование информационных систем, применяемые методы обслуживания, эффективность различных подходов и стратегий обслуживания
- Примеры проведенных реконструкций ВЛ

Эксплуатационная готовность линий электропередачи, как отметил в своём вступительном слове организатор этой части дискуссионного заседания П. Пензерини (Италия), зависит не только от надёжности их механических составляющих и электрического оборудования, но также и от их ремонтпригодности. Продолжительность периодов неготовности ВЛ к работе может быть минимизирована не только благодаря мерам по снижению вероятности технологических нарушений и аварий, принятым при проектировании и строительстве линий, но и посредством выполнения таких эксплуатационных и реконструктивных процедур, которые позволяют исключить наличие слабых мест в структуре ВЛ, своевременно выявить и предотвратить процессы деградации и, в конечном счете, свести к минимуму продолжительность периодов ремонта и восстановления элементов сетевого хозяйства после аварий. Так, в частности, выполнение работ на действующих ВЛ без снятия напряжения, использование роботов, БПЛА и других высокотехнологичных устройств существенным образом способствует достижению упомянутой выше цели, сокращения продолжительности периодов неготовности линий к работе.

Доклад В2-301, представленный специалистами из Южной Африки, посвящен изучению проблемы замены стеклянных изоляторов ВЛ  $\pm 533$  кВ, введенной в эксплуатацию в 1974 г., композитными. Основной причиной частых отключений ВЛ, является интенсивное загрязнение стеклянных изоляторов птичьим помётом. Применение композитных изоляторов, а также установка на опорах устройств, препятствующих посадке птиц, позволяет, по мнению авторов доклада, не позволит только снизить количество аварийных отключений, но и существенно увеличить пропускную способность линии, увеличив токи нагрузки в 1,8 раза. Кроме того, замена линейной изоляции позволит увеличить габариты проводов до земли и до элементов конструкции опор, что даст возможность перевести линию на повышенное напряжение  $\pm 600$  кВ и также будет способствовать увеличению пропускной способности данной электропередачи.

В докладе В2-302 (Южная Африка, Швеция) описаны результаты реализации комплекса мероприятий по исследованию состояния стеклянных изоляторов ВЛ 400 кВ, подверженных интенсивным загрязнениям, и их замене стойкими к загрязнениям композитными изоляторами из силиконовой резины. Загрязнение изоляторов ВЛ, находящихся вблизи Кейптауна, происходит в результате переноса продуктов горения кустарников в саванне, а также от воздействия проводящего солевого тумана, приносимого ветрами со стороны океана. При проведении мероприятий по замене изоляторов на действующей линии (рис.14) применялась технология выполнения работ без снятия напряжения ВЛ, что позволило избежать перерывов в электроснабжении потребителей в регионе с высокой плотностью населения и развитой промышленной инфраструктурой.



Рис.14. Замена стеклянных изоляторов композитными на ВЛ 400 кВ

Доклад В2-303 (Франция) представляет опыт применения БПЛА для обследования и оценки технического состояния стальных решётчатых опор ВЛ (рис.15), находящихся в эксплуатации более 60 лет. На летательном аппарате установлена фото камера высокого разрешения. С устройством работают два оператора, один из которых осуществляет дистанционное управление БПЛА, а другой контролирует работу камеры, выбирая наиболее важные объекты съёмки. Применение такой технологии позволяет существенно повысить безопасность работ, обследовать фрагменты опор недоступные для обзора с земли, документировать и хранить данные обследований. Для проведения работ с применением этой технологии не требуется отключений и перерывов в эксплуатации ВЛ. На основании анализа результатов обследований разрабатываются программы ремонта и восстановления работоспособности элементов конструкций, подверженных деградации, что позволяет продлить срок службы отдельных опор и ВЛ в целом.



Рис.15. Применение БПЛА для обследования технического состояния ВЛ  
 а- коррозия стальных уголков опоры, б – БПЛА в процессе обследования опоры

В докладе В2-304 (Индия) рассматривается драматическая ситуация в сетевых предприятиях северной части страны, связанная со значительным увеличением числа аварийных отключений ВЛ 400 кВ переменного тока и линий 500 кВ постоянного тока из-за перекрытий гирлянд стеклянных изоляторов. Значительный рост промышленной активности и плотности населения региона привел к резкому ухудшению экологической обстановки и увеличению интенсивности загрязнений изоляторов выбросами металлургических, химических предприятий и выхлопными газами автомобилей. Все доступные меры, принимавшиеся для улучшения ситуации - очистка изоляторов с применением вертолётов (рис. 16), применение защитных силиконовых покрытий, увеличение числа изоляторов в гирляндах, не дали заметного эффекта. Поэтому с 2008 г. производится планомерная работа по замене стеклянных изоляторов композитными, которые обладают более высокой гидрофобностью и,

поэтому в меньшей степени подвержены перекрытиям в условиях интенсивных загрязнений. Всего на 48 ВЛ установлено 73600 композитных изоляторов, что привело к снижению числа аварийных отключений более, чем в 40 раз. Широкое применение композитных изоляторов планируется продолжить и в других районах Индии, где существуют подобные экологические проблемы.



Рис.16. Очистка изоляторов от загрязнений с применением вертолѐта

В целом дискуссия, проведенная на пленарном заседании ИК В2 «Воздушные линии», продемонстрировала высокий интерес к происходящим в отрасли инновационным процессам и новым высокотехнологичным разработкам.

Ведущий аналитик ООО «ОПТЭН Лимитед»  
к.т.н., ст.н.сотр., постоянный представитель РНК в ИК В2 СИГРЭ  
Шкапцов В.А.