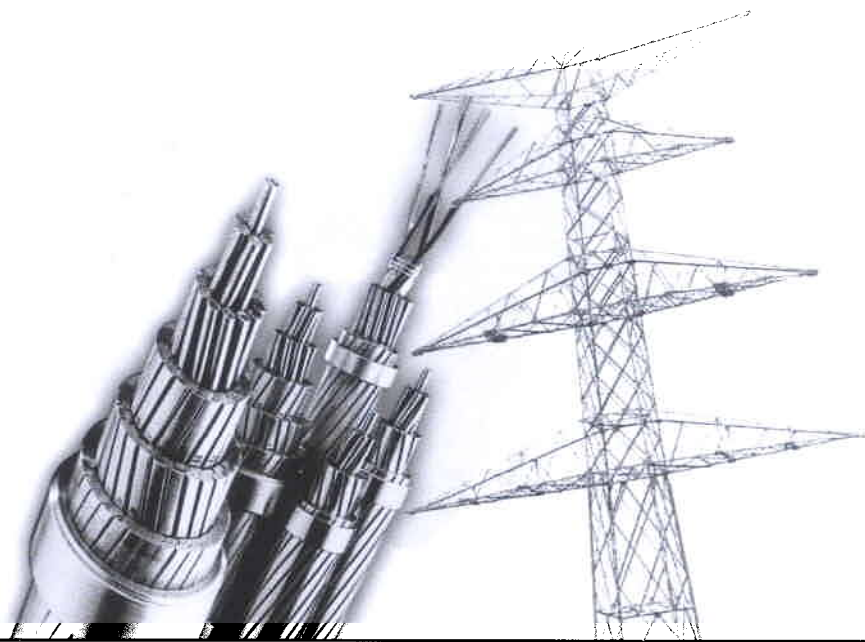


Nexans



---

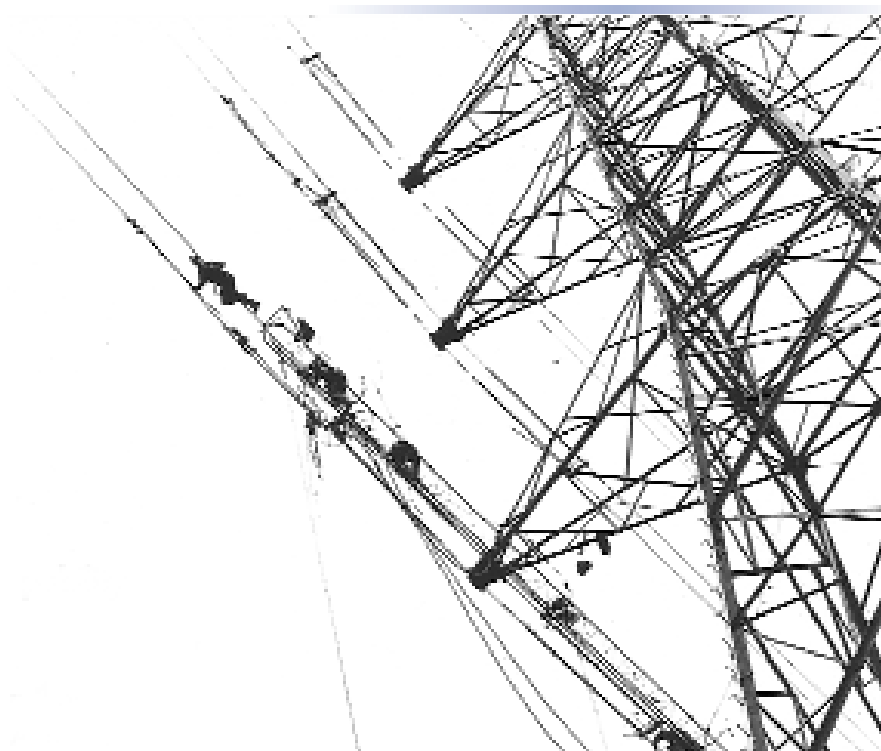
AERO-Z® . The solution for future-oriented overhead power lines

## Содержание

	Стр.
Введение .....	2
Историческая справка .....	3
Налипание снега на провода .....	4
Траектория перемещения провода .....	6
Преимущества провода AERO-Z® .....	6
Технические параметры проводов AERO-Z® .....	7
Проекты с использованием проводов AERO-Z® .....	8

## Приложения

Опыт Бельгии по совершенствованию характеристик имеющихся воздушных ЛЭП .....	10
Улучшение рабочих характеристик высоковольтных ЛЭП с помощью компактных фазных и молниезащитных тросов .....	18
Увеличение допустимой токовой нагрузки воздушных линий электропередачи за счет использования компактных проводов .....	29



## Полный комплекс систем передачи и распределения энергии

10 лет назад компания Алкатель Кабель (NEXANS – ее новое название) – крупнейший производитель кабельной продукции в Европе – начала сотрудничать с Россией. Сейчас более 40 кабельных заводов Франции, Германии, Норвегии, Швейцарии, Бельгии и Турции, входящих в группу Nexans, поставляют на российский рынок СИП типа "Торсада", кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена на среднее (6-35 кВ) и высокое (110-500 кВ) напряжение, подводные кабельные системы, кабельную арматуру и т.д.

За эти годы кабельными системами промышленной группы Nexans были оснащены аэропорты и нефтеперегонные заводы, электрические сети и атомные станции, отели, музеи и нефтепроводы. От Краснодара до Анадыря в самых разных условиях работают изделия NEXANS. К тому же компания является одним из лидеров в производстве СКС (структурированных кабельных систем) и по праву гордится участием в таких престижных, сложных проектах в области энергетики, как

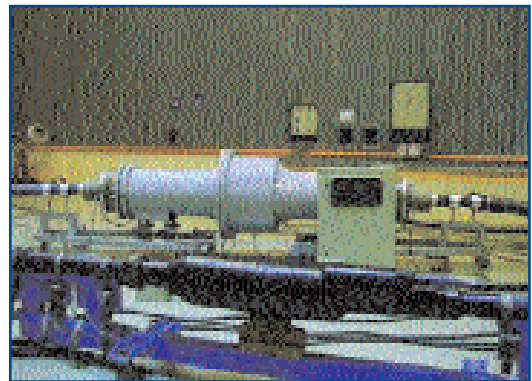
строительство третьего транспортного кольца в Москве, реконструкция Русского музея, космодром Байконур.

Компания "Нексанс" инвестирует значительные средства в новое оборудование. Это позволяет нам гарантировать высокий уровень технологического процесса, материалов и продукции. Все производство подвергается сквозному контролю качества и соответствует стандартам ISO 9001 в отношении процессов разработки, внедрения, производства, установки и ввода в эксплуатацию продукции.

Качество является неотъемлемой составной частью общей культуры ведения бизнеса нашей компании.

Фундаментом нашей плодотворной работы является уникальный научный потенциал исследовательских центров Nexans, использующих новейшие технологии и уникальное лабораторное оборудование.

Надежность и качество наших кабелей подтверждено соответствующими сертификатами и решениями.



## Основные продукты и услуги

### Низковольтные кабели

Пластмассовые кабели с ПВХ-изоляцией или изоляцией из сшитого полиэтилена

### Кабели среднего напряжения

Кабели с ПВХ-изоляцией или с изоляцией из сшитого полиэтилена, в полиэтиленовой, ПВХ или галогеноочистой и огнестойчивой оболочке. По запросу кабели могут изготавливаться с продольной герметизацией или двойной герметизацией.

### Кабели высокого напряжения

Кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена с продольной герметизацией или двойной герметизацией напряжением до 525 кВ. По запросу кабели могут изготавливаться с включением в тело кабеля оптоволоконных линий.

### Специальные кабели

Подводные кабели.  
Кабели для электрофильтров.  
Шахтные кабели.  
Огнестойчивые галогеноочистые кабели.

Бронированные кабели.

**Самонесущие изолированные провода "Торсада" на напряжение 0,6/1 кВ**

**Самонесущий изолированный кабель "Торсада" на напряжение 6-35 кВ**

**Компактные провода AERO-Z<sup>®</sup> для высоковольтных линий электропередачи**

**Нагревательные кабели** (теплые полы, системы антиобледенения, системы обогрева трубопроводов и т.д.)

**Муфты для кабелей среднего и высокого напряжения.** (Муфты термоусадочные и холодной усадки, производимые на одном из наших заводов "Euromold").

**Полный комплекс услуг по обучению персонала, монтажу и шеф-монтажу кабельных систем и сопутствующего оборудования.**

**Проведение испытаний и диагностика кабельных систем.**



<sup>®</sup> AERO-Z<sup>®</sup> зарегистрированная торговая марка.

## Историческая справка

Первая линия с Аеро-Z<sup>®</sup> проводами и грозозащитными тросами была сооружена в Бельгии в 1974 году. Эта линия имеет длину 2,59 км и пересекает реку Шельду, соединяя АЭС и морской порт г.Антверпен (см. рис1). Строительство такой ЛЭП было обусловлено необходимостью передачи большой мощности через широкую судоходную реку (высота под проводом не менее 70 м при самом высоком уровне воды в реке). При этом на линию оказывают огромное влияние сильные ветра, характерные для данных мест.

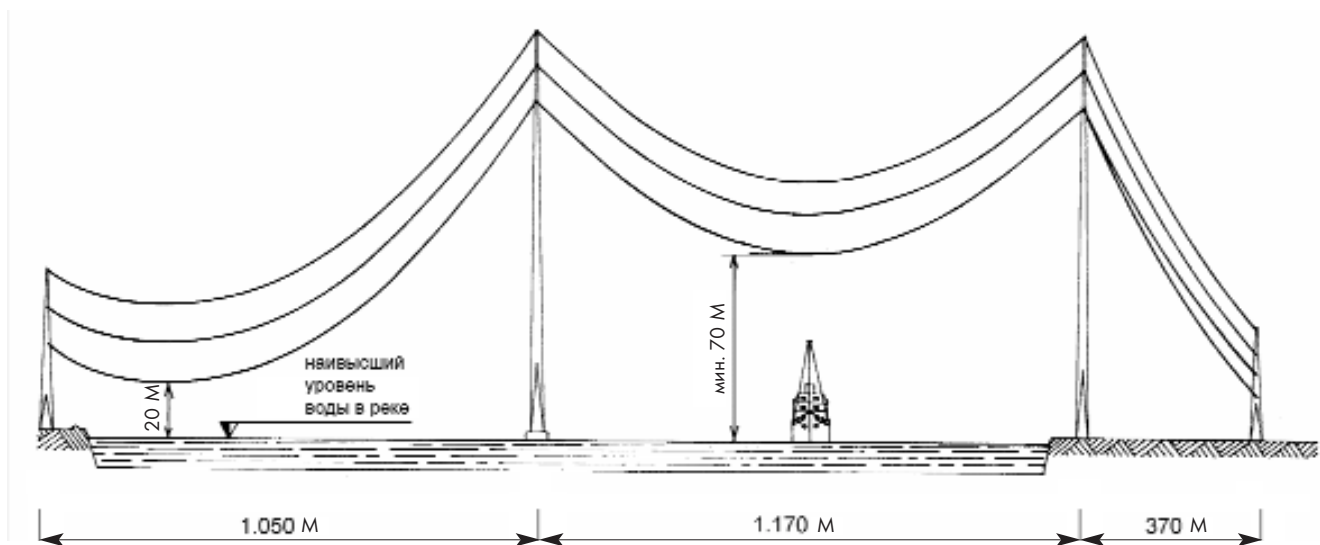


Рис.1

В начале 90-х годов фирма Nexans ( в то время Alcatel Cable) вернулась к этому продукту, но уже на другом технологическом уровне и с учетом всех замечаний, полученных во время эксплуатации ЛЭП.

Причинами для этого были:

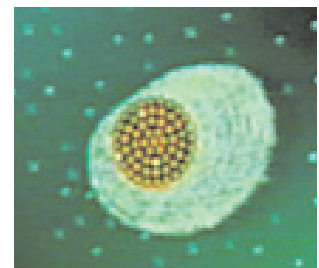
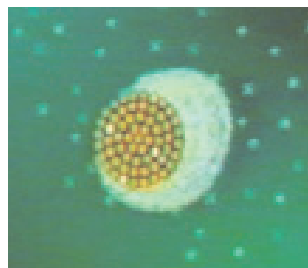
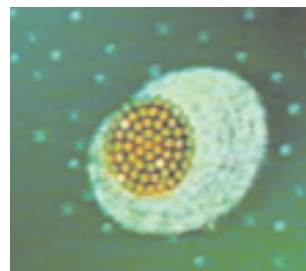
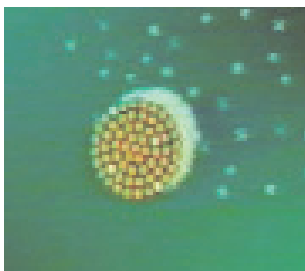
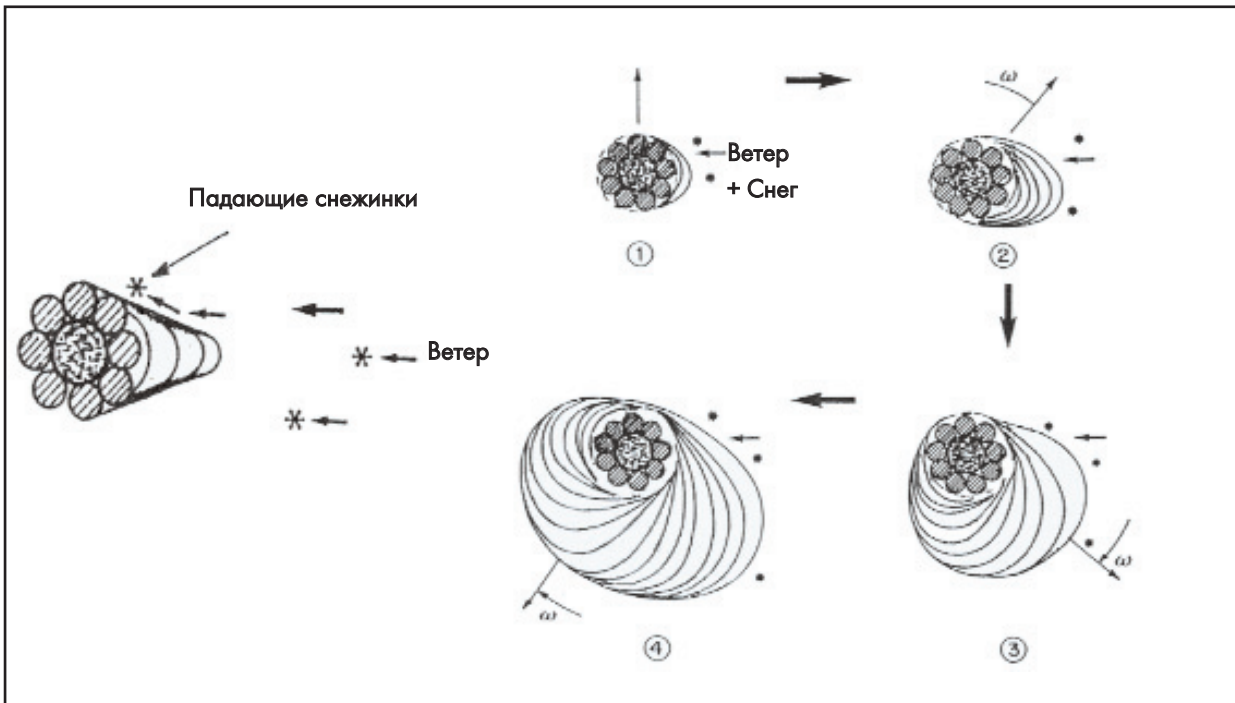
- необходимость увеличения пропускной способности существующих линий;
- снижение механических нагрузок, прикладываемых к опорам ЛЭП, из-за пляски проводов;
- повышение коррозионной стойкости проводов и тросов;
- снижение риска обрыва провода при частичном повреждении нескольких внешних проволок из-за внешних воздействий, в том числе в результате удара молнии;
- улучшенные механические свойства проводов при налипании снега или образовании льда.

Решением этой проблемы явилось появление нового поколения провода Аеро-Z<sup>®</sup>, запатентованного концерном Nexans. В настоящее время в Бельгии смонтировано более 2000 км такого провода на напряжения 63–400 кВ. Начиная с 1995 г. в Бельгии все строящиеся или реконструируемые линии электропередачи оснащаются проводом Аеро-Z<sup>®</sup>. Во Франции в ближайшие 10 лет также намечено осуществить переход на данный вид провода, монтируя примерно 1500 км/год. В Южной Америке построено более 1200 км таких линий и планируется монтаж еще 1500 км.



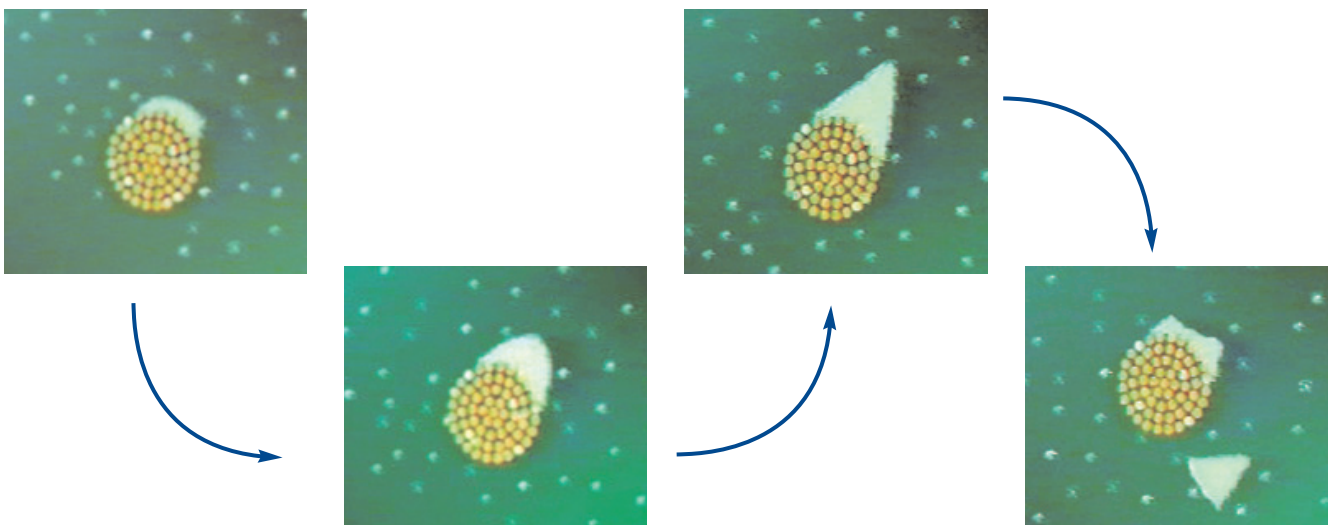
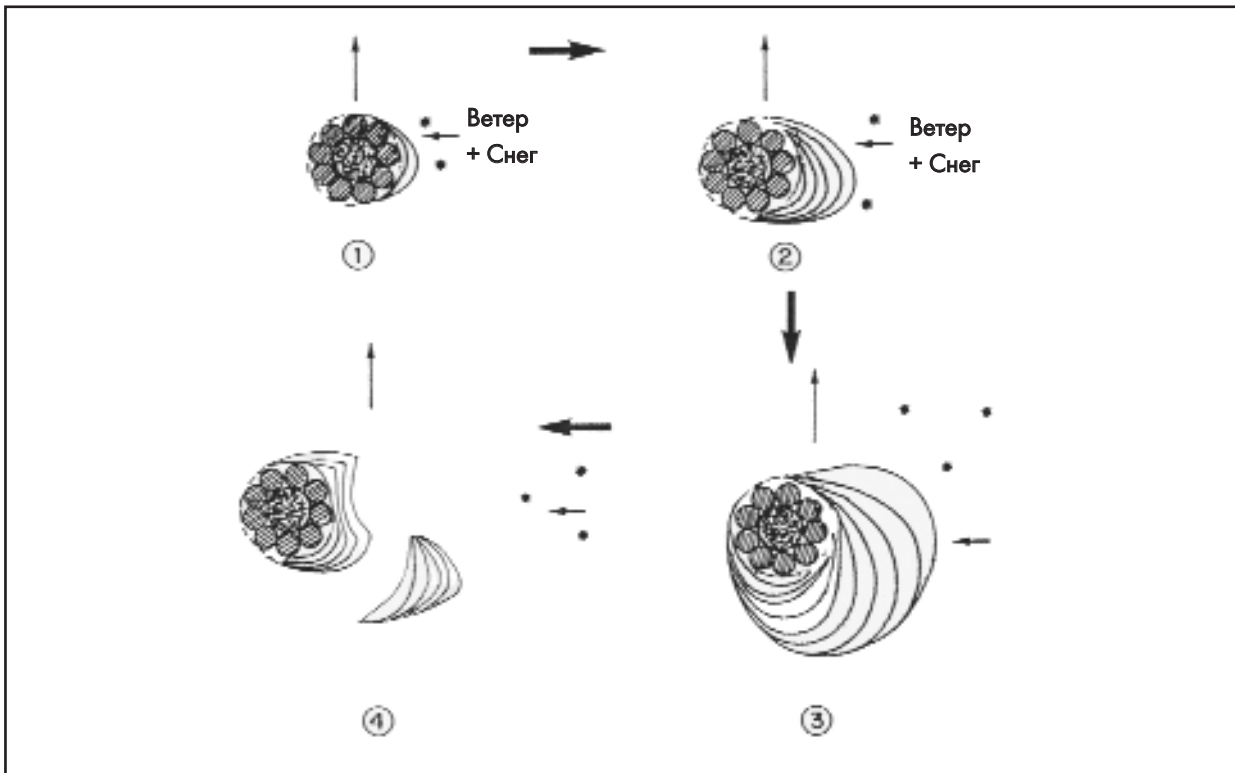
Налипание снега на провода высоковольтных линий

Традиционные провода типа АС

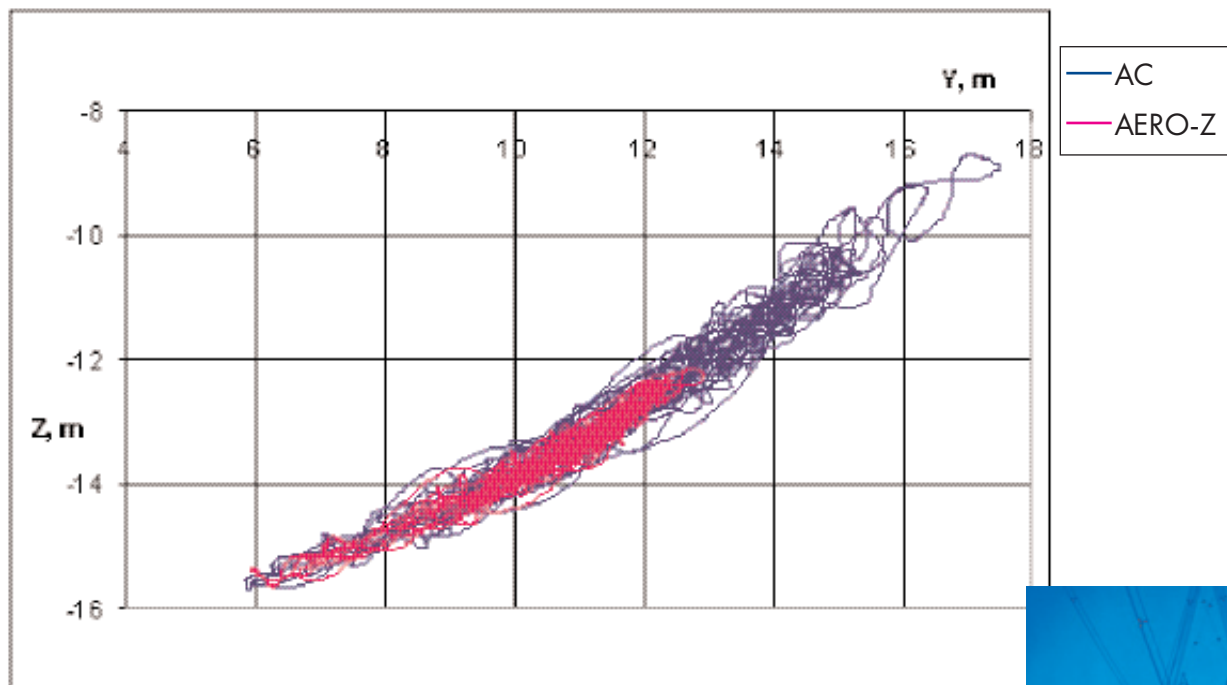


**Налипание снега на провода высоковольтных линий**

**Провода Aero-Z®**



## Траектория перемещения провода в вертикальной плоскости в середине пролета.



### Преимущества AERO-Z®

- Возможность использования проводов с большими сечениями при том же удельном весе приводит к решению проблемы перегрузок ВЛ и снижению тепловых потерь при транспортировке электроэнергии.
- Снижение пляски проводов.
- Возможность использования существующей арматуры при монтаже.
- Значительное снижение аэродинамического коэффициента.
- Снижение уровня шума, следовательно улучшение эксплуатационных показателей в населенных районах.
- Практически полное предотвращение внутренней коррозии провода.
- Снижение вероятности обрыва провода при нанесении ему повреждений в результате внешних воздействий.
- Снижение уровня усталости металла в проводе и следовательно увеличение жизненного цикла за счет самогашения колебаний.
- Решение проблемы обледенения и налипания снега на провода.

## Технические параметры проводов AERO-Z®

Тип провода	Площадь поперечного сечения провода	Составляющие					Диаметр провода	Удельная масса провода	Удельное сопротивление провода при 20 °С	Номинальное усилие на разрыв
		Круглые проволоки		Z-образные проволоки						
		Число проволок	Диаметр проволок	Число повивов	Число проволок	Высота слоя				
	мм <sup>2</sup>	шт.	мм	–	шт.	мм	мм	кг/км	Ом/км	даН
177-1Z	176,93	1+6	3,30	1	12	3,30	16,50	488	0,1895	5 698
242-2Z	241,98	1+6	2,70	2	12+18	2,70	18,90	671	0,1391	7 793
261-2Z	261,34	1+6	2,80	2	12+18	2,80	19,60	724	0,1288	8 417
301-2Z	301,25	1+6	3,00	2	12+18	3,00	21,00	835	0,1117	9 702
346-2Z	345,65	1+6	3,20	2	12+18	3,20	22,40	958	0,0974	11 132
366-2Z	366,13	1+6	3,30	2	12+18	3,30	23,10	1 014	0,0919	11 617
455-2Z	455,14	1+6+12	2,90	2	18+24	2,90	26,10	1 266	0,0742	14 658
504-2Z	503,95	1+6+12	3,05	2	18+24	3,05	27,45	1 401	0,0670	16 230
538-2Z	538,03	1+6+12	3,15	2	18+24	3,15	28,35	1 496	0,0628	17 327
635-1Z	635,12	1+6+12+18	3,50	1	24	3,50	31,50	1 761	0,0530	20 152
648-2Z	648,38	1+6+12	3,45	2	18+24	3,45	31,05	1 803	0,0521	20 573
666-2Z	665,92	1+6+12	3,50	2	18+24	3,50	31,50	1 852	0,0507	21 130
705-2Z	704,97	1+6+12	3,60	2	21+27	3,60	32,40	1 961	0,0479	22 369
707-2Z	706,76	1+6+12	3,60	2	18+24	3,60	32,40	1 965	0,0478	22 425
928-3Z	928,45	1+6+12	3,35	3	18+24+30	3,35	36,85	2 593	0,0365	29 460



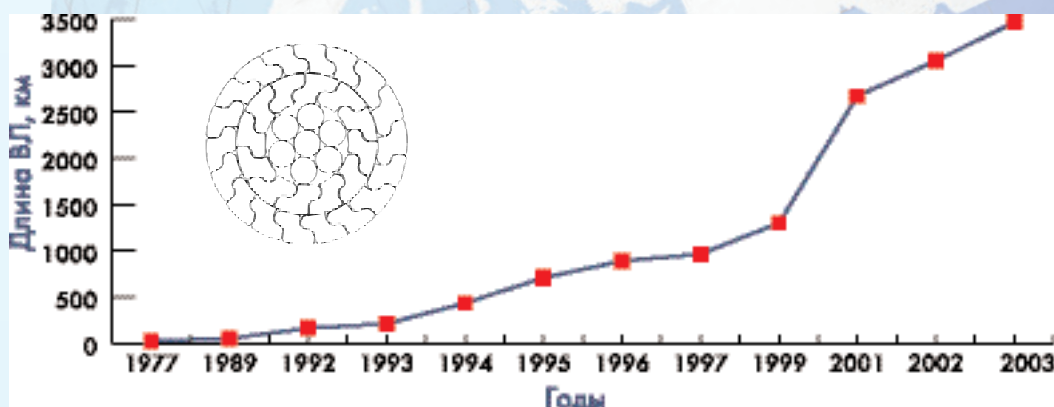
## Проекты с использованием проводов AERO-Z®

### Основные достижения

- 1970            150 кВ LILLO SOLVAY, трехцепная линия с проводами сечением 617 мм<sup>2</sup>, один повив Z-проволок, длина 5 км
- 1974            380 кВ DOEL-ZANDVLIET, переход через реку Шельда, двухцепная линия, длина 16 км, эквивалентное сечение проводов – 1 642 мм<sup>2</sup>, тросов – 600 мм<sup>2</sup>
- 1977            150 кВ район BAISY-THY, одноцепная линия, длина 24,1 км, сечением 362 мм<sup>2</sup>, один повив Z-проволок
- 1982            380 кВ экспериментальная линия VILLEROUX-HOUFFALIZE, пятицепная линия, длиной 5 км, сечение – 620 мм<sup>2</sup>, один повив Z-проволок
- 1989            28 км –70 кВ район BATTICE – компактная линия с проводами сечением 245 мм<sup>2</sup>, два повива из Z-проволок + 70 кВ район KERSBEEK, двухцепная линия (замена существующих проводов 210 мм<sup>2</sup> типа AC) с проводами сечением 245 мм<sup>2</sup>, два повива Z-проволок
- 1990            70 кВ MONTIGNIES-GILLY, двухцепная линия (замена существующих проводов 210 мм<sup>2</sup> типа AC) с проводами сечением 245 мм<sup>2</sup>, два повива Z-проволок.  
150 кВ BEERST-KOKSYDE, длина – 51 км, сечение – 445 мм<sup>2</sup>, два повива Z-проволок.  
50 кВ EISERINGEN, длина – 10 км, сечение – 445 мм<sup>2</sup>, два повива Z-проволок.
- 1991            150 кВ –STADEN BEERST, трехцепная линия, длина – 17,5 км, сечение – 445 мм<sup>2</sup>, два повива Z-проволок.  
380 кВ –LANGERBRUGGE-HAMME, длина – 10 км, сечение – 621 мм<sup>2</sup>  
Чехословакия – AERO-Z® сечением 446 мм<sup>2</sup>, 1 км для квалификационных испытаний.  
Исландия – AERO-Z® сечением 536 мм<sup>2</sup>, 2 км для сравнительных тестов под снегом.
- 1995-1996      Эквадор – 69 кВ, длина – 83,5 км, сечение – 183 мм<sup>2</sup> для INECEL  
Словакия – длина -10,5 км, сечение – 536 мм<sup>2</sup> для ELEKTROVOD
- 1992-1997      Поставка около 1200 км проводов AERO-Z® для Бельгийских энергетических компаний.
- 1994-1997      Осуществлен план совместно с Electricit De France-PECHINEY и Hydro-Qubec по строительству ВЛ с проводом сечением 661 мм<sup>2</sup> (высокой проводимости).

- 1998-1999 Belgian Utility ELECTRABEL смонтировало 400 км AERO-Z<sup>®</sup> сечением 705 мм<sup>2</sup>.
- 2000
  - Перу – 537 км AERO-Z<sup>®</sup> сечением 455 мм<sup>2</sup> для ETECEN.
  - ELECTRABEL – 70 кВ Angleur – 12 км AERO-Z<sup>®</sup> сечением 455 мм<sup>2</sup>
- 2001
  - Перу – 700 км AERO-Z<sup>®</sup> сечением 455 мм<sup>2</sup> для ETECEN.
  - ELECTRABEL via GTI – 150 кВ Auvélais-Tergnïe-Seilles – 12 км AERO-Z<sup>®</sup> сечением 455 мм<sup>2</sup>
  - ELECTRABEL via Fabricom – 150 кВ Hoenderveld-Wijgmaal-Tienen & Staden-West Rozebeek – 112 км AERO-Z<sup>®</sup> сечением 504 мм<sup>2</sup>
- 2002
  - Франция – 39 км AERO-Z<sup>®</sup> сечением 455 мм<sup>2</sup> для EDF (ISLAND OF LA REUNION)
  - Франция – 76 км AERO-Z<sup>®</sup> сечением 666 мм<sup>2</sup> (EDF/RTE) – La Boisse-Cusset
  - Франция – 51 км AERO-Z<sup>®</sup> сечением 346мм<sup>2</sup> для EDF (ISLAND OF LA REUNION)
  - ELIA – 150 кВ Vascoup-Monceau – 88 км AERO-Z<sup>®</sup> сечением 242 мм<sup>2</sup>
  - ELIA – 70 кВ Tergnïe-Auvélais – 61 км AERO-Z<sup>®</sup> сечением 346 мм<sup>2</sup>
  - ELIA (Via Engema) – 150 кВ Beerst-Koksijde – 50 км AERO-Z<sup>®</sup> сечением 504 мм<sup>2</sup>
  - ELIA (Via Fabricom) – 150 кВ Kallo-Kettenisse – 11 км AERO-Z<sup>®</sup> сечением 928 мм<sup>2</sup>
- 2003
  - ELIA – 150 кВ Bois l’Image-Tihange 30 км AERO-Z<sup>®</sup> сечением 707 мм<sup>2</sup>
  - ELIA – 150 кВ Vieux Genappe-Baisy-Thy 11 км AERO-Z<sup>®</sup> сечением 346 мм<sup>2</sup> + 54 км AERO-Z<sup>®</sup> сечением 455 мм<sup>2</sup>
  - Франция – EDF/RTE – 380 кВ Boutre-Coudon – 315 км AERO-Z<sup>®</sup> сечением 666 мм<sup>2</sup>.
- 1999-2010 Belgian Utility ELECTRABEL запланирован монтаж около 1400 км AERO-Z<sup>®</sup> проводов (в основном сечения 346 мм<sup>2</sup>, 504 мм<sup>2</sup> и 707 мм<sup>2</sup>).
- 2002-2010 EDF запланирована замена проводов 220 кВ линий на AERO-Z<sup>®</sup>. Скорость замены – от 1350 км до 2250 км проводов/год. Сечения 177, 261, 346, 455, 666 и 707 мм<sup>2</sup>.
- 2004 Начало продвижения проводов AERO-Z<sup>®</sup> в России и странах СНГ.

**Динамика увеличения длины линий электропередачи с проводами и тросами AERO-Z<sup>®</sup>**



# Опыт Бельгии по совершенствованию характеристик имеющихся воздушных ЛЭП 22-206

Сессия 2000, ©2CIGRE

Авторы: J. LAMSOUL (Tractebel\*), J. ROGIER (Tractebel), P. COUNESON (Tractebel), A.VAN OVERMEERE (Laborelec) БЕЛЬГИЯ.

## 1. Введение: достоинства технических проверок

В последние годы опубликовано немало статей, посвященных проблемам совершенствования или, по меньшей мере, поддержания удовлетворительного состояния воздушных ЛЭП в Бельгии. Этот подход основан с одной стороны на характеристиках высоковольтной сети ЛЭП, очень плотной, сильно переплетенной и относительно старой, а с другой стороны на сложности получения разрешений на возведение новых воздушных линий, необходимых для удовлетворения растущих потребностей в электроэнергии.

Когда отдельные старые линии находятся на последнем этапе срока их эксплуатации и нуждаются в полной или частичной замене, возникает вопрос о целесообразности оценки возможности существенной модернизации линии или проведении работ без учета дальнейших перспектив.

В Бельгии решения о комплексной реконструкции воздушных ЛЭП принимаются только после полного диагностирования [1].

## 2. Методология и процесс диагностирования

### 2.1. Методология диагностирования

Методологию диагностирования или экспертную оценку старой линии можно обобщить в виде следующей последовательности операций:

измерение – понимание – оценка – принятие решений – гарантии.

- Первая операция соответствует измерению деградации дефектных элементов (см. § 2.2.).
- Анализ дефектов позволяет понять механизм ухудшения параметров: внутренняя причина (коррозия, износ) обычно зависит от местных и/или переменных источников (ветра, обледенения, влажности). Причина может быть также внешней (молнии, падение деревьев) (см. § 5).
- Оценка риска (определенная в § 3) в отношении состояния дефектных элементов позволяет сравнивать различные варианты вмешательства.
- Решение о мерах, которые следует предпринять, может быть основано только на поддающихся количественному измерению критериях (см. § 3).
- Действия должны сопровождаться программой технического обслуживания, соответствующей гарантии новых возможностей линии и ее компонентов (см. § 2.4.).

### 2.2. Ухудшение качества, ведущее к высокому риску

Диагностирование должно выявить все виды вышеуказанных нарушений свойств, которые могут сопровождаться значительными рисками, как например:

- коррозия изготовленного из стали сердечника провода;
- коррозия проводников вблизи точек соединения;
- обрыв лент в элементах подвески провода;
- ослабление стержней изоляторов и износ фиксаторов безопасности;

---

\* Avenue Ariane 5-7, B-1200 – Брюссель, Бельгия

- повышенный износ или коррозия соединений гирлянды изоляторов с опорами в случае точечного контакта.
- недопустимые деформации и в общем случае все виды дефектов, которые не могут быть в обычном порядке устранены заменой или ремонтом.

В присутствииотягчающих окружающих условий отдельные виды рисков могут также быть очень значительны:

- оплавление оборванных лент на проводах с малым сечением вследствие удара молнии или в условиях отказа;
- плохое состояния изоляторов при наличии загрязнений;
- окончания траверсы опоры имеют устаревшую конструкцию (например: крепежные узлы не соосны, что вызывает скручивание траверсы);
- деформированные или отсутствующие стальные уголки, в случае случайных нагрузок, которые критичны для уголков;
- плохое заземление в случае возникновения неисправностей.

### 2.3. Процедура диагностирования

Процесс диагностирования состоит из следующих этапов [1]:

- Исчерпывающий сбор всех данных конструкторской документации, а также отчетов о техническом контроле и модернизации.
- Планирование общего технического обследования углубленного выявления дефектов без контакта с опорами.
- Выявление опасных участков средствами инфракрасной термографии (тепловизорами).
- Плановый останов, подробное обследование опор и линейного оборудования; отбор проб, демонтаж и полная замена гирлянд изоляторов, включая по мере возможности принадлежности; радиочастотный контроль проводников и элементов подвески.
- Составление первичного отчета с описанием состояния линии.
- Предоставление вторичного отчета с сопоставлением программ действий, предложенных энергетической компании для повышения пропускной способности линии.

### 2.4. Повышение производительности линии

Производительность линии определяется как произведение ее пропускной способности на доступность:

$$[\text{производительность}] = [\text{пропускная способность}] \times [\text{доступность}]$$

может быть улучшена различными способами, некоторые из которых изложены ниже:

$$[\text{пропускная способность}] = [\text{ток}] \times [\text{напряжение}]$$

Повышение значения номинального пропускаемого тока может быть достигнуто либо эксплуатацией проводов при повышенной температуре, либо использованием проводов большего сечения или с большей электропроводностью; уровень напряжения может быть увеличен более значительными изолирующими промежутками и, следовательно, в результате замены траверс и, возможно, верхней части опор.

$$[\text{доступность}] = [\text{надежность}] \times [\text{ремонтпригодность}]$$

Удельную надежность опоры и ее фундамента можно улучшить.

### 3. Общий критерий необходимых действий

Стратегия необходимых действий основана на абсолютном критерии минимизации двух основных чистых статей расхода:

- капиталовложений для улучшения производительности системы (включая эксплуатационные расходы и расходы на техническое обслуживание и ремонт);
- риски, связанные с неисправностью изделия и вероятностью последствий в финансовом выражении.

Предполагаемые расходы должны быть компенсированы по крайней мере уменьшением риска неисправности. Этот общий подход проанализирован более подробно рабочей группой 13 «Организация имеющихся линий» 22 комитета CIGRE по изучению данного вопроса.

Использованный в Бельгии практический подход описан ниже.

- Если риск слишком мал, может показаться необоснованным принятие соответствующих действий и риск будет допустим.
- Если риск окажется чрезмерным, воздушная линия будет исключена из эксплуатации или будет демонтирована.

Однако для регулирования риска можно использовать один из приведенных ниже вариантов с возрастающей ценой.

- Если риск установлен, мы можем предвидеть:
  - ограничение очередных затрат;
  - внеплановое техническое обслуживание по местной шкале;
  - замену или частичное восстановление срока службы элементов оборудования линии.
- Если риск обобщен, но при этом опоры и фундаменты оснований по-прежнему находятся в хорошем состоянии, можно рассмотреть вопрос обновления проводов, а также линейного оборудования (обновление или существенная замена компонентов ЛЭП).
- Проводящая способность может быть улучшена установкой новых проводов, обладающих повышенной электропроводностью и не требующих укрепления опор и их фундаментов (повышения проводящей способности).
- В общем случае монтаж проводов с более крупным сечением требует усиления опор и фундаментов (увеличения конструкционной прочности) для несения повышенных нагрузок.

Все комплексные вмешательства в существующие воздушные линии должны быть согласованы с планом развития сети.

### 4. Типы обследованных сетей и их особенностей

#### 4.1. Типы сетей

Техническое диагностирование в Бельгии применяется только к ЛЭП со сроком эксплуатации более 40 лет. Поскольку линии напряжением 380 кВ были разработаны только в конце 1960-х годов, технического освидетельствования в Бельгии требуют только линии, рассчитанные на напряжение 70 или 150 кВ.

Эти сети относятся по большей части к 1930–1940 годам. То есть им, как правило, более 50 лет. Все несущие конструкции представляли собой опоры, соединенные болтами, заклепками или сваркой, не оцинкованные, но из регулярно окрашиваемых уголков.

Поскольку воздушные линии на напряжение 70 и 150 кВ, созданные после 1960-х годов, имеют более современную конструкцию, результаты технического диагностирования в отношении линий со средним сроком эксплуатации 50 лет не могут быть экстраполированы на более поздние линии.

## 4.2. Компоненты воздушных линий

В общем случае все чертежи старых линий, по меньшей мере представляющие собой горизонтальные проекции и продольные профили, являются редкими и устаревшими. Если они даже существуют, они не обновлялись.

Более того, поскольку подробная предыстория этих линий недоступна, трудно узнать реальное положение и состояние их составляющих элементов в целом.

Провода старых линий на напряжение 70 кВ имеют незначительное сечение и обычно изготовлены из меди; молниезащитный трос изготовлен из бронзы и имеет небольшое сечение. Одной из особенностей данной линии является ее своевременная модернизация. Изначально предназначенные для эксплуатации на напряжение 50 кВ, они были в дальнейшем приспособлены для работы на напряжение 70 кВ. Модернизация включала удлинение траверс и, в отдельных случаях, переход от двухцепных линий к одноцепным.

Провода старых линий, рассчитанных на 150 кВ преимущественно изготовлены из алюминиевых проводов и снабжены стальным сердечником (сталеалюминиевые провода – АСРС), с поперечным сечением около 200 мм<sup>2</sup>. Изначально трос изготавливали из стали.

Как и линии на напряжение 70 кВ, так и линии на напряжение 150 кВ были модифицированы через одно или два промежуточных напряжения (70 и 110 кВ). Эта ситуация подтолкнула к усовершенствованию верхней части опор, часто с многочисленными вариациями.

А в линиях на напряжение 150 кВ использовавшийся изначально стальной трос был заменен проводником с большим сечением, изготовленным, как правило, из алюминиевого сплава (АААС), позволяющего увеличить стойкость к току короткого замыкания. Эта модернизация привела к замене верха опор и поднятию ее для компенсации прогиба нового молниезащитного троса.



Рис.1. Типовая доработка линий на напряжение 150 и 70 кВ

## 5. Создание модели проведения диагностирования ВЛ

### 5.1. Карты

Для обеспечения возможности проверки нормированных габаритов линии в местах пересечения препятствий подготовлены новые горизонтальные и вертикальные проекции линии.

Эти чертежи были получены методами воздушной фотосъемки, что позволило значительно сократить сроки и затраты по сравнению с тем, как если бы эти работы проводились наземными методами [2].

Они позволяют:

- обеспечить более оптимальный режим работы линий вследствие того, что все препятствия были точно определены по фотографиям, сделанным в масштабе 1:7000 и планам согласно земельному кадастру;
- обнаружить критические участки: воздушные промежутки между линиями и новыми зданиями и сооружениями, участки, где необходимо провести обрезку и/или спиливание деревьев;

- проанализировать возможность эксплуатации линий при повышенной температуре (увеличенной с 40°C до 60°C, и даже до 75°C, что допускается бельгийским законодательством).

## 5.2. Провода

### 5.2.1. Общее состояние

Исследование общего состояния и внутренней коррозии в первую очередь в проводах основано на металлографическом анализе образцов проводов, отобранных либо из перемычек или ниток анкерных креплений, либо нуждающихся в замене пролетов.

Установлено, что оцинкованные сердечники перемычек стареют быстрее, чем сердечники проводов в пролетах, что можно объяснить отсутствием механического натяжения, следовательно, более легким доступом к стальным проводам атмосферных загрязнений. Соответственно, провода находятся в хорошем состоянии, если в таком состоянии находятся перемычки.

Если состояние проводов типа ACSR вызывает сомнения, может быть предпринято исследование пролетов и наиболее характерных с точки зрения окружающей среды мест с использованием детектора коррозии воздушных ЛЭП [1], [4].

Измерение остаточной толщины цинкового слоя на оцинкованных стальных проводах позволяет косвенно установить, посредством сравнения с данными вихретокового метода, наличие существенной гальванической коррозии между стальным сердечником и слоями алюминия. Этот процесс начинается автоматически в отсутствие цинка и критичен для расчетного срока службы сталеалюминиевых проводов типа ACSR. При этом регистрируется часть пролета, подвергнутая определенной степени коррозии.

Поскольку отсутствие оцинковывания неизбежно приводит к ухудшению со временем состояния проводов, их остаточный срок службы становится более непредсказуемым.

### 5.2.2. Сети на напряжение 70 кВ

Статистический анализ показал, что 70% случаев обрыва проводов происходит на старых воздушных линиях, оснащенных медными или аналогичными проводами небольшого сечения, до 50 мм<sup>2</sup>.

Токи короткого замыкания и механические перегрузки (ветровые) могут вызвать разрушение, если проводник малого сечения был предварительно поврежден. Эти ослабленные участки в большей степени возникают вследствие непосредственного воздействия на провод электрического дугового разряда. Другая возможная причина разрушения кроется в чрезмерном нагреве провода при коротком замыкании в подверженных коррозии местах в местах подвески или возле них.

К числу средств устранения подобных дефектов можно отнести:

- установку дугогасительных приспособлений, если таковые отсутствуют;
- защиту провода в месте его крепления к подвеске усиливающим стержнем;
- переход от изоляторов А-типа к комплектам изоляторов с одиночной подвеской (для увеличения электроизоляционного расстояния проводов);
- замену имеющихся проводов.

Однако незначительное сечение и характер проводов делают их замену чрезмерно дорогостоящей. Например, замена проводами из алюминиевого сплава (АААС) с большим поперечным сечением может потребовать усиления опор.

Поэтому решение вопроса о замене проводов проводами такого же сечения полностью оправданно при условии, что некоторые модернизированные линии можно будет эксплуатировать при повышенных температурах.

Необходимо помнить о том, что хотя линии были спроектированы изначально для эксплуатации при температуре 40°C, вполне возможно за незначительный счет повысить их рабочую температуру до 75°C, что допускается согласно действующему законодательству Бельгии. Это можно сделать с небольшими вложениями, поскольку пролеты очень малы (до 200 м). Увеличение рабочей температуры с 40°C до 75°C позволяет увеличить нагрузочную способность в 2,6 раза.

### 5.2.3. Сети на напряжение 150 кВ

На проводах типа ACSR выявлено существенное повреждение оцинковывающего слоя на стальном сердечнике, что способствует чрезмерной гальванической коррозии алюминиевых проволок и, что приводит в дальнейшем к значительному снижению механической прочности проводов.

В этом случае провода заменяются более компактными и аэродинамичными проводами типа AERO-Z [3] с таким же внешним диаметром.

Эта методика исключает проведение интенсивной проверки и/или усиления опор, и в то же время пропускная способность увеличивается на 17%.

Поскольку имеется молниезащитный трос, но он подвергался замене двадцать лет назад. Его состояние вполне приемлемо и не требует вмешательства, за исключением некоторой регулировки провеса.

## 5.3. Гирлянды изоляторов

Обследование гирлянд изоляторов линий на напряжение 70 и 150 кВ показывает ускоренный износ отдельных элементов, особенно П-образных болтов ушек, обеспечивающих соединение подвески гирлянд к опорам.

Также линейное оборудование подверглось сильной коррозии (дугоотводящие кольца, шаровые и гнездовые соединения, болты и пр.).

Как и в большинстве случаев, провода подлежат обязательной замене, что будет логично в контексте оптимизации прочности, а также замены и модернизации гирлянд изоляторов. Например:

- соединение гирлянд с траверсами опоры петлями для исключения точечного контакта;
- установка монтажных зажимов с тройными сочленениями, рассчитанными для проводов с усиливающими стержнями, для уменьшения изгибных моментов в проводнике;
- установка упрочненных стеклянных изоляторов взамен фарфоровых.

## 5.4. Опоры

Опоры подлежат регулярной окраске с тем, чтобы их состояние соответствовало бы допустимой степени коррозии их стальных уголков.

Некоторые профили подвергаются изгибу, скручиванию или сжатию и должны быть заменены. В отдельных редких случаях наличие интенсивной коррозии потребовало полной замены уголков; а именно зоны контакта штыря с бетоном, которая является наиболее критичной.

Как ранее уже упоминалось, определенные линии были подвергнуты определенной модернизации согласно изменения их уровня напряжения. Некоторые виды указанных модификаций были сделаны вполне корректно, и нуждаются во внесении лишь незначительных изменений. Однако некоторые были сделаны неадекватным образом и потребовали существенного вмешательства или даже полной замены верхней части опор, поскольку этот вариант оказался наиболее надежным и даже менее дорогостоящим.

## 5.5. Опорные основания

Отмеченные в старых фундаментах признаки ухудшения их состояния обычно были связаны с плохой укладкой бетона: недостаточное смешивание бетона, наличие карманов гравия и пор в бетоне вследствие недостаточного виброуплотнения бетона при укладке, а также пониженной концентрации цемента. Это приводит к недостаточной механической прочности.

На некоторых фундаментах можно наблюдать со временем эрозию в песке и гранулах бетона. Цемент, который должен связывать их химически, постепенно подвергается химической агрессии со стороны содержащихся в песке сульфатов и хлоридов и/или органических веществ используемых в бетоне песков. В определенных условиях образование повышенного засоления и щелочных реакций вызывает расширение бетона, которое может привести к развитию внутренних трещин и разрывов.



В настоящее время для исключения образования неизвестных ранее дефектов используются только апробированные цементы.

К счастью следует отметить, что общее состояние забутованного бетона лучше, чем состояние бетона, доступного обзору. Возможно, вода в верхней части бетона испаряется быстрее вследствие обдува воздухом, в то время как нижние слои находятся во влажном состоянии, будучи менее подвержены погодному фактору. В настоящее время верхняя часть опорных оснований всегда снабжается защитой (от влаги, осушивающим составом) в процессе просушивания.

Верхний слой определенных конструкций часто недостаточно поднят и иногда погружен в землю в зависимости от условий грунта. В результате штыри могут обрасти вследствие развития растительности, что может вызвать преждевременную коррозию от постоянного воздействия влажности.

Поэтому рекомендуется приподнимать конструкции для исключения их частого и дорогостоящего обслуживания. Прочие несущие конструкции просто требуют очистки покрывающего грунта до уровня, соответствующего окружающей местности.

Однако всеобщее ухудшение состояния части несущих конструкций выше уровня грунта требует их ремонта. Не менее существенно, чем их деградация будет продолжаться под действием климатических факторов.

## 6. Практический опыт увеличения нагрузочной способности линий

### 6.1. Создание методологии анализа повышения нагрузочной способности

Принимая во внимание заключения диагностированных, имеющих целью оценку необходимости замены проводов и связанных таким образом со значительными капиталовложениями, может оказаться целесообразным провести дополнительные исследования, направленные на оценку различия в затратах на соответствующее повышение пропускной способности рассматриваемых линий.

Если наружный диаметр новых проводов окажется больше, чем имеющихся, и это приведет к необходимости увеличения нагрузки на опоры, законодательство Бельгии по электротехническому оборудованию потребует проверки конструкционной прочности опор, включая их опорные основания (с точки зрения модернизации).

Эта проверка должна осуществляться согласно положениям действующих законодательных норм, т.е. с учетом нормальной максимальной скорости ветра 126 км/ч и исключительной максимальной скорости ветра 178 км/ч (с двойным динамическим давлением по отношению к указанному).

Второе предположение безусловно является достаточно жестким для имеющихся линий и особенно касается стальных опор линий на напряжение 70 кВ.

Однако мы располагаем наблюдениями, что влияние второго фактора на опоры и фундаменты в некоторой степени смягчается при использовании компактных проводов типа AERO-Z [3], для которых соответствующий аэродинамический коэффициент уменьшается в 0,83 раза для диаметров менее 27,65 мм и в 0,62 раза для диаметров между 28 и 30,65 мм.

### 6.2. Сети на 70 кВ

Требуемые законодательными нормами проверки приводят к необходимости усиления опор и даже более радикальных мер, поскольку расстояние между ногами опор слишком мало.

В результате подавляющее большинство опор требует удвоения ног опор от нижних траверс до уровня фундамента. В этом случае представляется более экономичным заменить все имеющиеся опоры новыми с аналогичными конструкциями, но изготовленными из стали повышенного качества.

Также опорные основания, выполненные в виде монолитных плит, требуют упрочнения, хотя и в менее значительных объемах, для сохранения монолитного характера фундамента. Это предполагает, что свойства бетона не ухудшаются, что не всегда имеет место на практике.

В предположении о том, что опорные основания имеют хорошее качество, установлено, что увеличение стоимости, которое, как уже упоминалось, исчисляется весовыми коэффициентами к базис-

ному решению, при замене проводов, проводами другого диаметра, коэффициент будет находиться в следующем диапазоне:

- 2,3 и 3,2 в случае усиления опор;
- 2,0 и 2,2 в случае замены опор;

Если опорные основания имеют плохое качество, что предполагает вмешательство в каждый фундамент, указанные коэффициенты приобретают значения соответственно, 4,7 и 4,3.

### 6.3. Сети на напряжение 150 кВ

Для сетей на напряжение 150 кВ ситуация проще и в большей степени поддается регулированию.

Это обычно обусловлено тем фактом, что опоры имеют иную конфигурацию, чем линии на напряжение 70 кВ, имеющие упрощенные возможности усиления: либо замена с использованием временных уголков, либо дублирование уголков, или добавление вторичных ребер жесткости для уменьшения степени податливости подлежащих упрочнению элементов. Более того, опорные основания подушек и опорных оснований для каждой ноги имеют более высокое качество и облегчают упрочнение.

Проблема обычно связана с повышением гидроустойчивости оснований.

С точки зрения затрат, различие в базовом решении (замена имеющихся проводов проводами такого же диаметра) заключается в следующем:

- для увеличения нагрузочной способности на 45% базовая цена должна быть умножена на коэффициент от 1,45 до 1,7;
- для увеличения нагрузочной способности на 80 % базовая цена должна быть умножена на коэффициент от 1,65 до 1,90;

Вообще говоря, можно сделать вывод о том, что для сети напряжением 150 кВ коэффициент затрат фактически равен множителю для передаточной способности линии.

## 7. Заключение

Лучшее понимание реальных возможностей или фактических параметров и доступности воздушных линий электропередачи, основанное как на стандартной методологии технического диагностирования, так и на данных предыстории, вытекающих из эксплуатационной статистики и отчетов обследования, помогает выработать соответствующие решения по оптимизации ЛЭП. Приведенные примеры в настоящем отчете подтверждают данный постулат.

### Выражение признательности:

Мы выражаем искреннюю признательность следующим авторам за их вклад в отчеты по диагностированию: J.L. Berlemont, B. Brijs, A. Bruneau, E. Celens, B. De Waele, D. Francois, A. Gille, Y. Le Roy, N. Michalakis, R. Sverzutti и E. Vilret.

## Использованная литература

[1] Delree X., Rogier J., Van Overmeere A : Порядок диагностирования существующих ЛЭП и методология оценки, основанная на практическом опыте. Отчет CIGRE 22-302; Париж, 1994.

[2] Rogier J., Goossens L., Mazoin M., Robberechts W., De Clerck E., Jadot A: Отражение данных о проекте. Отчет CIGRE 22-209; Париж, 1996.

[3] Couneson P., Lamsoul J., Delplanque D., Capelle T., Havaux M., Guery D., Delree X. : Улучшение рабочих характеристик имеющихся высоковольтных ЛЭП с помощью полностью замкнутых и заземляющих проводов Отчет CIGRE 22-209; Париж, 1998.

[4] Rogier J., Goossens L., Lilien J.L., Wolfs M., Van Overmeere A, Lugentz L.: Опыт проведения эпизодических и постоянных измерений на воздушных линиях Бельгии. Отчет CIGRE 22-104; Париж, 1998.

# УЛУЧШЕНИЕ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЛЭП С ПОМОЩЬЮ КОМПАКТНЫХ ФАЗНЫХ И МОЛНИЕЗАЩИТНЫХ ТРОСОВ 22-209

Сессия 1998, ©2CIGRE

P. COUNESON – J. LAMSOUL, D. DELPLANQUE (Tractebel), TH. CAPELLE – M. HAVAUX,  
D. GUERY (Alcatel Cable Benelux) (Бельгия), X. DELREE, CPTÉ.

## АННОТАЦИЯ

В свете возрастающего неприятия населением и административными органами, ответственными за планирование городских и сельских объектов, идеи сооружения новых высоковольтных ЛЭП, бельгийские компании рассматривают технологии, способные обеспечить растущие потребности в передаче электроэнергии.

Увеличение передающей способности имеющихся линий за счет использования компактных фазных проводов – марки AERO-Z® – доказало их особенную потенциальную экономическую и техническую привлекательность.

Вслед за кратким введением в предмет о компактных проводах в настоящем отчете приведено описание приложения этой методики к фазным проводам и оптическим кабелям, встроенным в молниезащитный трос (OPGW):

1) Компактные проводники:

- фундаментальное обоснование увеличения использования компактных проводов;
- важнейшие характеристики и испытания;
- применение компактных проводов в Бельгии.

2) Оптические кабели, встроенные в молниезащитные тросы:

- проблемы, связанные с использованием воздушных линий с оптическими волокнами;
- конструкция проводов, проводимые испытания, методики измерения и сравнение OPGW с круглыми электрическими проводами и OPGW с Z-образными проводами.

Ключевые слова: проводник, оптический кабель, встроенный в молниезащитный трос (OPGW), компактный провод, провод с Z-образными проволоками, самозатухание, пляска проводов, снег, мороз, воздушные ЛЭП, оптические волокна.

## I. ПЕРВАЯ ЧАСТЬ: КОМПАКТНЫЕ ФАЗНЫЕ ПРОВОДА

### 1. ПРОИСХОЖДЕНИЕ КОМПАКТНЫХ ПРОВОДОВ

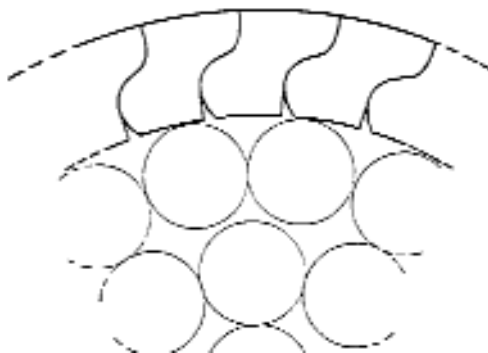
В ходе 76-й сессии CIGRE Бельгия представила отчет об аэродинамических характеристиках новых проводов для воздушных ЛЭП с длинными пролетами [1].

В настоящем отчете описана высоковольтная воздушная линия с пролетами увеличенной длины (при пересечении реки Эско (Escaut)), оснащенная изготовленными из алюминия проводами с гладкой наружной поверхностью.

Решение использовать такие провода было принято в силу риска колебательной неустойчивости обычных проводов при постоянных наклонных ветрах со скоростью от 45 до 56 км/ч. Важнейшим фактором для разработчиков явился риск появления пляски проводов в отсутствие мороза [2].

Отчет 76 сессии детально рассматривал основания для выбора провода с гладкой наружной поверхностью, набранного из проволок Z-образного профиля (см. рис. 1). Кратко напомним, что провода с Z-образными проволоками оказались предпочтительнее проводов с трапецеидальными жилами, поскольку скрутка таких проводов из алюминиевого сплава приводит к образованию последова-

тельных ступенек на поверхности провода. В дополнение к этому, поскольку трапецеидальные жилы не всегда идеально соприкасаются, вибрация проводов под действием ветра может вызвать увеличение наклона жил и тем самым увеличение высоты ступенек.



**Рис.1. Фрагмент поперечного сечения компактных проводов**

Более того, при обрыве трапецеидальных жил, их клиновидная форма выталкивает жилы на поверхность провода. В противоположность сказанному проводу с Z-образными проволоками перекрывают друг друга, нижняя часть одной проволоки располагается под верхом прилегающей проволоки.

Тем не менее, если технические аспекты Z-образных проволок изначально вызвали интерес пользователей, коммерческий успех оказался более эфемерным в силу дороговизны изготовления проводов с Z-образными проволоками методом прокатки.

Был предпринят ряд исследовательских проектов, направленных на то, чтобы сделать этот тип проводов конкурентоспособным с традиционными проводами.

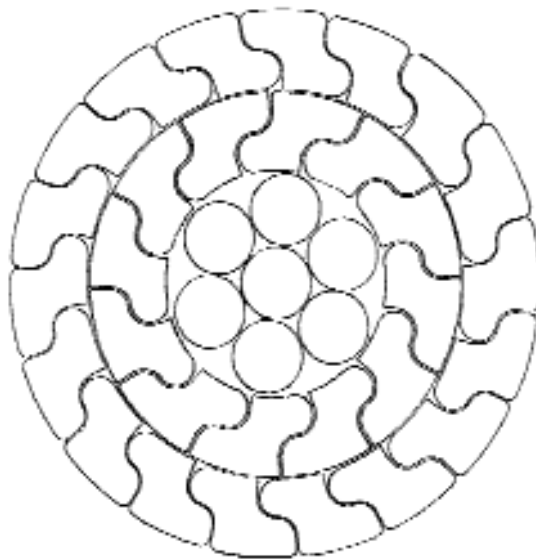
В конечном счете, эта цель была достигнута производством таких проводов с проволоками Z-образного профиля с использованием метода волочения вместо прокатки.

## 2. ФУНДАМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ УВЕЛИЧЕНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОМПАКТНЫХ ПРОВОДОВ

С конца 1980 г. сооружение новых высоковольтных линий столкнулось с нарастающим противодействием как со стороны населения, так и администрации, ответственной за городское и сельское планирование. Эта ситуация привела бельгийские компании к необходимости пересмотреть технологии таким образом, чтобы обеспечить удовлетворение растущих потребностей в увеличении максимальной передаваемой токовой нагрузки сети.

Вместо систематического рассмотрения проблемы строительства новых линий увеличение пропускной токовой способности имеющихся линий доказало свою особую привлекательность как с технической, так и экономической точек зрения.

Для достижения этой цели был разработан компактный проводник нового типа – т.н. AERO-Z®. Для наружного слоя (слоев) взамен круглых будут использоваться проволоки Z-образного профиля, пока остается необходимость в их использовании, наружный слой, практически идеально гладкий, имеет незначительные винтовые канавки, возникающие между верхними кромками Z-образных проволок с тщательно подобранными шагом скрутки, глубиной и шириной. Совместно с Институтом Фон Кармана (Von Karman Institute), Брюссель, были проведены испытания, сконцентрированные прежде всего на оптимизации эффектов, связанных с канавками (см. рис. 2) [3].



**Рис. 2.** Поперечное сечение провода AERO-Z®

Таким образом достигается значительное уменьшение коэффициента аэродинамического сопротивления наиболее сильным ветрам (см. табл. 1). Такое уменьшение влечет за собой меньшие механические напряжения в опорах при проводах равного диаметра или позволяет увеличить полезное электропроводящее сечение при равных механических напряжениях в опорах за исключением случая максимальных ветровых нагрузок.

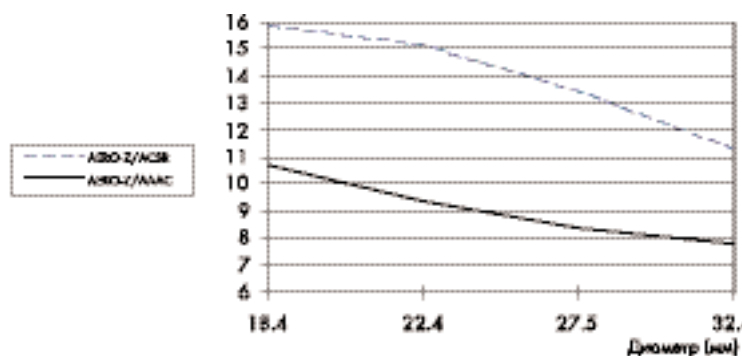
**Таблица. 1**

**Коэффициент аэродинамического сопротивления в зависимости от диаметра за исключением максимального ветра (175 км/ч на высоте 10 м над уровнем земли)**

Номинальный диаметр провода (мм)	18,90 = d < 28,35	28,35 = d < 31,50	31,50 = d < 36,85	36,85 = d < 50
Номинальная площадь поперечного сечения (мм <sup>2</sup> )	245 = S < 536	536 = S < 621	621 = S < 926	926 = S
Макс. коэффициент аэродинамического сопротивления для проводника AERO-Z®	0,80	0,60	0,55	0,46
Макс. коэффициент аэродинамического сопротивления для провода с круглыми проволоками	0,95	0,95	0,95	0,95

Эти функции были рекомендованы бельгийскими правилами эксплуатации электрооборудования [4].

Таким образом это приводит к увеличению (см. рис. 3) допустимой токовой нагрузки имеющихся воздушных ЛЭП простой заменой проводов одного типа проводами другого типа равного диаметра, т.е. без необходимости усиления опор (при этом, строго говоря, необходимо проверить влияние на угловые опоры увеличения напряжения подвески, обусловленного увеличением веса, если имеется намерение работать при постоянном прогибе). Если требуется большее увеличение передающей



**Рис. 3**

**Передающая способность по току для провода AERO-Z® и проводов из обычного алюминиевого сплава (AAAC) или стале-алюминиевыми (ACSR) проводами**

способности, то использование компактных проводов в любом случае уменьшает требования к арматуре и фундаментам по сравнению с тем случаем, когда линии будут оснащены традиционными проводами.

Помимо значительного увеличения передающей способности при идентичном уровне механических напряжений в опорах, этот тип проводов обладает рядом дополнительных существенных преимуществ, обосновывающих его широкое применение. Ниже изложены подробные характеристики и испытания, которые подтверждают изложенное выше.

### 3. ВАЖНЕЙШИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ИСПЫТАНИЯ

В дополнение к традиционным испытаниям, предписанным бельгийским стандартом NBN C34-100 [5], регламентирующим характеристики проводов для ЛЭП, были разработаны и успешно реализованы методики специальных испытаний, ориентированные специально на компактные провода.

#### 3.1. Коррозия

Большая контактная поверхность между двумя Z-образными проволоками одного слоя обеспечивает эффективную защиту от просачивания консистентной смазки изнутри провода. В процессе изготовления все внутренние пустоты провода заполняются консистентной смазкой, подаваемой при температуре +120°C, что позволяет удалить воздух и влагу. В этой связи внутренняя защита оказывается лучше, чем у традиционных проводов, в которых наблюдается вытеснение защитной смазки наружу под действием циклов нагрузки.

Компактный провод, в противоположность этому, сохраняет неизменный уровень защиты от коррозии, что обеспечивает замедленное старение.

Указанное явление было продемонстрировано измерениями, выполненными на обыкновенных и компактных проводах (с одним повивом Z-образных проволок), установленных в 1970 г на одной линии (Лилло – Сольвей) и демонтированных в 1988 г. вследствие изменения маршрута (табл. 2).

Таблица. 2

**Измерения, проведенные на обычном и компактном проводах (с одним слоем Z-образных проволок), установленных в 1970 г и демонтированных в 1988 г**

Тип провода	Изменение веса смазки	Изменение прочности проводов на растяжение		Изменение среднего удлинения при обрыве	
		Внутренние слои	Наружные слои	Внутренние слои	Наружные слои
Обычный	- 28 %	Не изменилась	-5%	-19%	- 26 %
Компактный с 1 Z-слоем	Не изменился	Не изменилась	-5%	- 9 %	- 2.2 %

#### 3.2. Деформационная способность

Даже при обрыве проволоки внешнего слоя провод AERO-Z<sup>®</sup> остается на месте под действием механических рабочих напряжений. Данное свойство сохраняется до тех пор, пока не происходит обрыв пяти смежных проволок.

#### 3.3. Самозатухание

Большая поверхность контакта между проволоками также улучшает демпфирование AERO-Z<sup>®</sup>.

Несколько типов обычных проводов и провод AERO-Z<sup>®</sup> подверглись колебаниям, вызванным освобождением груза (25, 50 и 75 кг), подвешенного в середине пролета. Записи механических напряжений в креплениях опор и амплитуды колебаний позволяют сравнить коэффициенты самозатухания этих проводников.

Так, в проводе состоящем из Z-образных повивов, изгибающие и крутящие колебания затухают в 2 – 3 раза быстрее, чем в обычном проводе.

### 3.4. Пляска проводов

Улучшенное вертикальное и крутящее самозатухание провода AERO-Z<sup>®</sup> значительно уменьшает проблемы сложной пляски. Вероятность появления пляски значительно ниже, и если она возникает, ее амплитуда будет значительно меньше.

Наблюдение характера пляски проводов AERO-Z<sup>®</sup> в реальных условиях подтвердило результаты испытаний в аэродинамической трубе компактного провода первого поколения [1].

### 3.5. Снег и обледенение

Натурные испытания показали, что провод AERO-Z<sup>®</sup> также лучше противостоит снегу и обледенению. Образование ледяных «рукавов» становится более затруднительным, и даже невозможным. Средняя масса ледяных наростов составляет половину наблюдаемой при экстремальных условиях.

Более того, следует отметить, что наросты отделяются быстрее.

## 4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОВОДОВ AERO-Z<sup>®</sup> В БЕЛЬГИИ

Учитывая важные преимущества рассматриваемых проводов AERO-Z<sup>®</sup> и хорошие первоначальные показатели, полученные на ЛЭП в 1970-1980-х гг., бельгийские компании решили в начале 1990-х г. устанавливать их повсеместно.

В результате в 1991 и 1992 гг. были построены 5 линий с использованием данного типа проводов. Даже несмотря на то, что общая протяженность установленных в эти годы проводов AERO-Z<sup>®</sup> ограничивается всего лишь примерно 200 км, это составляет 60% всей длины линий, введенных в эксплуатацию в эти годы.

К концу 1997 г. суммарная длина линий на основе AERO-Z<sup>®</sup> превысила 1000 км.

Планируется увеличить суммарную протяженность линий в 1999 году примерно до 2500 км (см. рис. 4).

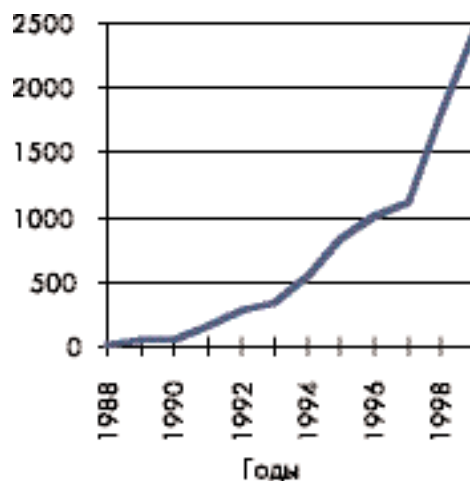


Рис. 4

## II. ВТОРАЯ ЧАСТЬ: МОЛНИЕЗАЩИТНЫЕ ТРОСЫ СО ВСТРОЕННЫМИ В НИХ ОПТИЧЕСКИМИ КАБЕЛЯМИ (OPGW)

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Для удовлетворения растущих потребностей в передаче информации между различными точками сети, а также взятого на себя бельгийскими компаниями обязательства соблюдать выделенный им частотный диапазон, бельгийский электротехнический сектор принял решение разработать новую телекоммуникационную сеть на основе оптоволоконной технологии.

Таким образом уже в течение нескольких лет производится систематическое планирование ВОЛС для всех новых проектов и реконструкция воздушных ЛЭП и подземных кабелей.

Поскольку значительная часть этой новой телекоммуникационной сети использует существующие воздушные линии, возникла необходимость разработки проводов с интегрированными оптическими волокнами, адаптированными к данной конкретной ситуации.

### 2. ПРОБЛЕМЫ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ С ОПТИЧЕСКИМИ ВОЛОКНАМИ

#### 2.1. Выбранная технология

Среди различных доступных технологий, пригодных для монтажа оптоволоконна на имеющиеся линии, бельгийский электротехнический сектор решил использовать почти исключительно молниебезопасные тросы со встроенными оптическими волокнами (OPGW): в качестве троса для новых линий, а также в качестве замены троса в имеющихся линиях. Таким образом, они одновременно выполняют функцию молниебезопасного троса и информационного носителя.

Этот выбор был основан на двух существенных критериях:

- гарантированная надежность электрического функционирования и передачи информации;
- исключение или сведение к минимуму роста механических напряжений в опорах и сопутствующего усиления опор.

#### 2.2. Требования к воздушным линиям со встроенными оптическими волокнами

Подобно обычным тросам, OPGW должны выполнять функцию защиты фазных проводов, и таким образом обладать полезной площадью проводящего сечения, способной выдерживать токи короткого замыкания и молний.

Кроме того, в случае замены молниебезопасных тросов на существующих линиях важно ограничить наружный диаметр с тем, чтобы обеспечить соответствие ранее установленным критериям (§2.1).

В дополнение к этому, подобно любому проводу, подвешенному между двумя опорами, механические напряжения в нем и удлинение постоянно варьируются согласно климатическим условиям (температура, ветер, ледовая нагрузка). Поэтому во внимание необходимо принимать влияние изменения длины провода на оптические волокна.

Можно рассмотреть два подхода:

- оптические волокна жестко связаны с металлическими элементами троса. В этом случае удлинение троса неизбежно приведет к удлинению оптических волокон. Поэтому крайне важно, чтобы это удлинение было ограничено таким образом, чтобы даже при наиболее неблагоприятных условиях эксплуатации удлинение оптических волокон оставалось в допустимом диапазоне.
- оптические волокна абсолютно свободны внутри троса. При наиболее неблагоприятных условиях эксплуатации механические напряжения внутри троса не передаются оптическим волокнам. Таким образом, риск обрыва волокон за счет удлинения самого провода отсутствует. Для



троса такого типа понятие 'избыточная длина' является фундаментальным. Она определяется как максимальное значение деформации всего молниезащитного троса, при превышении которого волокна подвергаются растягивающему напряжению. Чем выше этот запас, тем более волокна механически свободны относительно троса.

Бельгийский электротехнический сектор в конечном счете остановил свой выбор на втором подходе, поскольку испытания показали его способность обеспечить деформационный запас при усилиях до 60% от разрушающей нагрузки, т.е. нагрузка выйдет за границы нормальных и исключительных эксплуатационных нагрузок.

## 3. КОНСТРУКЦИЯ МОЛНИЕЗАЩИТНЫХ ТРОСОВ

### 3.1. Оптический сердечник

Оптический сердечник представляет собой центральный элемент из алюминия с 4 пазами, в каждый из которых вложена трубка из синтетического материала, внутри которой находятся 12 оптических волокон.

Оптические волокна уложены в трубки свободно и скручены в жгут с контролируемой избыточной длиной. Это, в совокупности с обоснованным выбором диаметра трубок их параметров скрутки (длины и радиуса укладки), обеспечивает возможность гарантировать отсутствие возникновения механических напряжений в волокнах даже если провод заземления на протяжении своего срока службы подвергнется избыточным нагрузкам.

Защита оптических волокон от влаги рассматривалась во многих аспектах. На основании имеющейся информации было принято решение обеспечить водонепроницаемость за счет трех компонентов: окружающего волокна тиксотропного геля, полиамидной трубки и покрывающей трубку консистентной смазки. Такая конструкция является лучшим компромиссным решением, гарантирующим защиту от влаги и невозможность возникновения в волокнах растягивающих напряжений.

Водонепроницаемость была в дальнейшем увеличена использованием во внешнем повиве Z-образных проволок согласно изложенной выше технологии производства проводов AERO-Z®.

### 3.2. Армирующий слой

#### 3.2.1. Количество внешних слоев жил

Установленные в бельгийских сетях OPGW первого поколения имели внутренний оптический сердечник, защищенный единственным слоем металлических проволок. Несмотря на то, что кабель при этом имел наименьший диаметр, а все остальные параметры были идентичны, такая конструкция быстро проявила два основных недостатка:

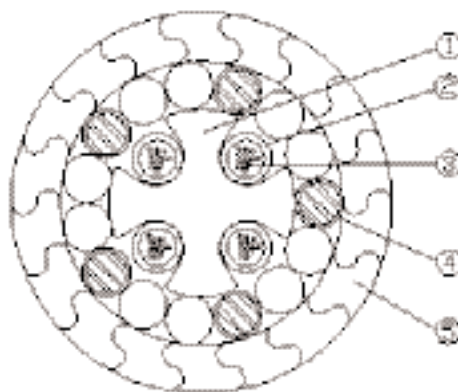
- данный провод с однослойным армированием в случае подвешивания обладает высоким крутящим моментом. По этой причине необходимо использование противоскручивающего устройства. Оно требует крайней осторожности, чтобы не повредить наружный слой;
- проведенные на проводах бельгийской сети испытания, подтвержденные результатами аналогичных зарубежных испытаний, показали, что защита оптического сердечника от удара молнии значительно лучше обеспечивается двумя слоями проволок, чтобы обеспечить минимальный диаметр проволок армирующего слоя.

Таким образом, в 1995 г. для обеспечения соответствия вышеуказанным требованиям были разработаны OPGW второго поколения. В настоящее время армирующий слой представляет собой двухслойную структуру, скрученную в противоположных направлениях.

#### 3.2.2. Состав внешних слоев жил

Кабели второго поколения с двойным наружным слоем обладают двумя следующими основными конструктивными особенностями:

- первое поколение: OPGW 225/31 содержит внешний повив, состоящий из 21-ой круглой проволоки из алюминиевого сплава, и внутреннего повива из 15-ти круглых проволок, из которых 10 изготовлены из алюминиевого сплава, а 5 – из алюминированной стали. Запас деформации в этом случае сначала составил 0,5%, затем 0,7% после оптимизации параметров скрутки;
- второе поколение: разработанные в 1996 г. OPGW 253/31 содержат оптический сердечник, идентичный предшествующему варианту, когда внешний повив, состоящий из 18-ти Z-образных проволок из алюминиевого сплава, и внутреннего повива из 15-ти круглых проводников, из которых 10 изготовлены из алюминиевого сплава, а 5 – из алюминированной стали. Таким образом AERO-Z® имеет такой же диаметр, как и провод первого поколения, изготовленный из таких же материалов (рис. 5).



1. Алюминиевая основа с пазами
2. Трубка из термопластика
3. Оптические волокна (4x12)
4. Плакированные алюминием стальные проводники
5. Полностью изготовленные из алюминия провода

**Рис. 5.** Поперечное сечение провода OPGW 253/31-1Z (содержит 48 оптических волокон)

Необходимость изготовления внутренних слоев из стальных проволок обусловлена испытаниями на разряд молнии. Поскольку удар молнии может повредить отдельные проволоки наружного повива, остаточная механическая прочность всегда будет выше, если стальные проводники деформируются во внутреннем повиве, где они меньше подвергаются воздействию.

Необходимо отметить также, что состав двух армирующих слоев металлического армирования (стальные проволоки с алюминиевым покрытием изнутри, проволоки из алюминиевого сплава снаружи) означают, что крутящие моменты двух слоев эквивалентны и что таким образом полученный провод фактически не имеет крутящего момента.

### 3.2.3. Роль и конструкция стальных проволок

Назначение алюминированных стальных проволок состоит в том, чтобы ограничить удлинение провода при заданном усилии.

Алюминированным стальным проволокам предпочтение было отдано по сравнению с оцинкованными стальными проволоками по двум причинам:

- для получения оптимальной длительной коррозионностойкости;
- для исключения реакции электрохимической коррозии между цинком и алюминием.

## 4. ПРОВЕДЁННЫЕ ИСПЫТАНИЯ, МЕТОДОЛОГИЯ ИЗМЕРЕНИЙ И СОПОСТАВЛЕНИЕ OPGW 225/31 (ТРАДИЦИОННЫХ) И OPGW 253/31-1Z (AERO-Z®)

### 4.1. Общие сведения

Испытания проволов были проведены по стандарту МЭК [6].

Наиболее значимыми по результатам оказались два вида испытаний: на растяжение (сжатие), а также на изгиб (прохождение проволок через ролики). Первое испытание было рассчитано на анализ тех явлений, при которых провод и в особенности оптические волокна подвергнуты растягивающим усилиям, приложенным к проводу. Второе испытание было предназначено на то, чтобы проверить, что при натяжении на провода даже в случае наиболее суровых условий не повлияет на оптические волокна.

Однако, также были проведены другие испытания: поведение провода при ударе молнии, коротком замыкании, а также воздействие циклических крутящих, изгибающих нагрузок. Также были проведены испытания на стойкость к вибрации и действию ветра и перепады температуры.

Оценивалась также совместимость провода с комплектующими компонентами.

Согласно принятым в Бельгии нормам принято считать, что воздушные провода подвергаются систематическим механическим нагрузкам, OPGW 225/31 и 253/31-1Z были также подвергнуты испытаниям при таких же условиях. Указанные испытания были проведены с целью проверки устойчивости поведения скрученного провода при растяжении (образовании полостей).

### 4.2. Методика измерений

Оптические волокна можно проверить посредством измерения затухания рефлектометром (OTDR). Этот метод, основанный на измерении затухания в волокнах, путем измерения времени и амплитуды отраженного сигнала в каждом оптическом волокне по всей длине волокна и общем затухании. Это значение представляет собой интегральное значение измерений. Данный метод измерений имеет преимущество – он требует лишь одностороннего доступа к волокну, позволяя обнаружить дефект, который и явился источником ослабления сигнала.

Однако быстро становится очевидным, что OTDR недостаточен для обеспечения того, чтобы гарантировать, что оптическое волокно ни в коем случае не будет подвергнуто воздействию механических напряжений.

Последующие исследования показали, что не все действующие на оптические волокна напряжения обнаруживаются OTDR. Фактически, рефлектометр позволяет выявлять макро- и микронапряжения и микротрещины в изогнутых оптических волокнах, которые создают выявляемые рефлектометром оптические потери. В противоположность этому, вплоть до определенного предела, растягивающие напряжения не могут быть обнаружены. Рефлектометрия, которая обычно является единственным средством измерения затухания, таким образом не позволяет определить уровень предельной нагрузки в проводе, которая приведет к возникновению напряжений в оптических волокнах.

Для того, чтобы обеспечить соответствие этой цели, использован метод, основанный на принципе изменения фаз оптических волокон. Этот метод включает проведение очень точного измерения оптического пути, что в свою очередь позволяет измерить длину оптического волокна. Посредством сравнения излученного и принятого на входе и выходе волокна сигналов можно измерить изменение фазы и таким образом отследить ее изменение, обусловленное общими напряжениями образца. При проведении измерений необходимо учитывать температурный эффект. Это позволяет обнаруживать напряжения при растяжении волокон достаточно задолго до того, когда это станет вполне очевидным.

### 4.3. Сравнение OPGW 253/31-1Z (AERO-Z®) и OPGW 225/31 (традиционный)

В результате испытания проводов этих двух типов были сформулированы следующие наблюдения:

#### 4.3.1. Водонепроницаемость проводов

Перекрытие Z-образных проволок наружного повива образует “трубчатую” структуру, которая выполняет роль барьера, обеспечивающего дополнительную водонепроницаемость. Более того, это явление было положено в основу разработки этого типа проводов.

#### 4.3.2. Механический аспект

Согласно конструкции, OPGW AERO-Z® может компенсировать значительно больше растягивающие напряжения, чем обычные OPGW вплоть до достижения предельного значения механической прочности;

OPGW 253/31-1Z имеет более низкий аэродинамический коэффициент, особенно в сильном ветре. Это снижает напряжения в опорах примерно на 17 % при ветрах исключительной силы (175 км/час на уровне 10 м над землей) в сравнении с механическими напряжениями, соответствующими ветрам той же силы в отношении OPGW 225/31).

#### 4.3.3. Электрические параметры

Электрические параметры OPGW AERO-Z® обеспечивают большую эффективную площадь при одинаковом диаметре. Таким образом, при одинаковой температуре, кабели смогут сохранить работоспособность при более чем 12% превышении тока короткого замыкания, или напротив, при одинаковом токе короткого замыкания, температура провода OPGW будет меньше примерно на 15°C.

#### 4.3.4. Прочие аспекты

Подобно любым другим проводам серии AERO-Z®, OPGW AERO-Z® имеют существенные преимущества в защите от коррозии, неустойчивости, самодемпфировании, поведении при галопировании, снеговых и ледовых нагрузках.

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изначально ориентированные на решение проблем при монтаже на пролетах увеличенной длины над реками компактные провода были разработаны в Бельгии в 1970 г.

Это явилось началом применения проводов AERO-Z<sup>®</sup>, имеющие более высокую пропускную способность, а также пониженный коэффициент аэродинамического сопротивления при обычных условиях привели к расширению их применения.

Те же самые причины привели к созданию компактных OPGW.

### IV. СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

[1] DRUTSKOY A – RIEZ M. – Аэродинамические характеристики новых проводов для удлиненных пролетов – (Aerodynamic characteristics of new conductors for long overhead spans) – CIGRE 1976-22.06.

[2] DAVIS D.A – RICHARDS D.J.W. – SCRIVEN R.A – Исследование осцилляций проводов 275 кВ линии в местах пересечения рек Severn и Wye – проц. IEE т. 110 No. 1, январь 1963г., стр. 205-218.

[3] OLIVARI D. – HAUCHART J-L – Etude en soufflerie aerodynamique de cables electriques a faible rugosite de surface – Institut von Karman de Dynamique des Fluides – chaussee de Waterloo, 72 B-1640 Rhode-Saint-Genese – Belgique Ref. : EAR 8710/DO-JLM/nt.

[4] Общие правила эксплуатации электроустановок – королевский указ от 10 марта 1981г., дополненный Правительственным Указом от 24 июня 1992г.,

[5] NBN C34-100 + дополнение – Цельные и витые проводники для ЛЭП.

[6] Проект издания IEC 1396 – Электрические, механические и физические требования и методы испытания оптических кабелей заземления.

# УВЕЛИЧЕНИЕ ДОПУСТИМОЙ ТОКОВОЙ НАГРУЗКИ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ЗА СЧЁТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОМПАКТНЫХ ПРОВОДОВ 22-201

Сессия 1998, ©CIGRE

Michele GAUDRY и Francis CHORE Electricite de France (ФРАНЦИЯ, Claude HARDY и Elias GHAN-NOUM), Hydro-Quebec (КАНАДА)

## 1. АННОТАЦИЯ

В статье рассматривается программа исследования и разработки компактных проводов на основе алюминиевых сплавов, которая была реализована Electricite de France и Hydro-Quebec с целью увеличения передаваемой мощности по воздушным ЛЭП. Впервые обсуждаются подходы, используемые каждым из участников для установления основных критериев проектирования таких проводов. Представлены геометрические и физические характеристики проводников и предполагаемые выгоды, а также совместно принятая программа испытаний. Программа включает испытания по определению электрических характеристик проводов, их теплопроводности, общего механического поведения, включая удлинение, способность к натяжению, коэффициент аэродинамического сопротивления и стойкость к вибрациям проводов под действием ветра. Статья завершается разделом, посвященным экономическим аспектам.

## 2. КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Однородный компактный провод, трапецеидальные и Z-образные проводники, алюминиевый сплав, допустимая токовая нагрузка в амперах, тепловые потери, термическое старение, механическое поведение, удлинение, способность к натяжению, аэродинамическое сопротивление и стойкость к вибрациям проводов под действием ветра, усталостные явления.

## 3. ВВЕДЕНИЕ

Во многих странах, особенно в Европе и Северной Америке, системы ЛЭП распространились достаточно широко, при этом новые линии прокладываются относительно редко. На рынке, характеризуемом многочисленными и часто не связанными между собой факторами – например, отсутствием регулирования и увеличением энергообмена между странами, ужесточением экологических требований, а также снижением капиталовложений – энергетические компании стремятся к оптимизации имеющихся линий и поиску путей увеличения пропускной способности линий электропередачи.

Исходя из указанной ситуации, многочисленные электротехнические компании предпочитают не заниматься конструктивной доработкой своих линий передачи, а вместо этого смягчать условия их эксплуатации. При переходе из статического режима эксплуатации в динамический режим пропускная способность сети магистральных ЛЭП сейчас определяется не на основании наиболее сложных сезонных атмосферных условий, а все чаще на основании фактических текущих условий или на основании возможных условий, которые могут быть предсказаны на основании краткосрочных прогнозов [1]. Другие компании могут предпочесть замену стандартно ис-

---

<sup>1</sup> Международный совет по крупным энергосистемам (International Council on Large Electric Systems) – примеч. перев.

пользуемых ими проводов такими, которые допускают эксплуатацию при температурах 230°C [2]. Однако, в любом случае увеличение допустимой токовой нагрузки достигается только за счет увеличения тепловых потерь.

Большинство компаний во всем мире в настоящее время используют круглые алюминиевые провода со стальным армирующим сердечником – сталеалюминиевые провода (ACSR). Во многих местах, особенно в Европе, используют круглые однородные провода на основе алюминиевых сплавов – (AAAC). Характеристики таких проводов играют основную роль при определении размеров соответствующих опор ЛЭП.

## 4. ОБОСНОВАНИЕ

Не будучи удовлетворены имеющимися в настоящее время технологиями, EDF и Hydro-Quebec искали возможность использования проводников с более высокой пропускной способностью, чем находящиеся в эксплуатации, и которые могли бы использоваться в качестве замены, и которые не требовали бы существенной доработки опор ЛЭП и не оказывали бы негативного влияния на надежность линии. Также было предпочтительно, чтобы арматура линии (например, подвесные зажимы, гасители колебаний) не требовали радикального изменения. Таким образом, после уточнения круга решаемых задач можно естественным образом определить основные критерии проектирования для новых условий.

Фактически, если придется использовать те же самые опоры без существенной переделки, предполагаемые климатические нагрузки возрасти не смогут, равно как и диаметр заменяющих проводников. Более того, для сохранения надежности линии в максимальной возможной степени необходимо убедиться, что механическая прочность новых проводников также сохранилась.

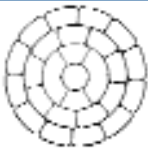

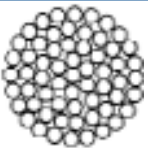
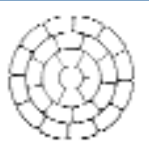


У обеих компаний имелись похожие подлежащие решению проблемы, но поскольку исходные условия были различны, это привело к разработке различных решений. Система электропередачи EDF была уже оснащена в значительной степени однородными проводниками типа AAAC, в то время как система передачи Hydro-Quebec была полностью оснащена проводниками ACSR-типа.

## 5. ВОЗМОЖНЫЕ РЕШЕНИЯ

EDF использовала двухаспектный подход в ходе реализации проекта [3], [4]:

- Совершенствование проводимости сплава и использование новых термических процессов при обработке проволок с целью изменить равновесие механической прочности/проводимости в сторону проводимости;
- Оптимизация проводящего сечения сохранением неизменного диаметра.

Работа протекала в тесном сотрудничестве с производителями алюминия и проводов. Исследование привело к разработке сплава с высокой проводимостью, который отвечал критериям механической прочности EDF. Оптимизация сечения производителем проводов привела к созданию гладкого компактного провода с проволоками Z-образного профиля. Также были исследованы компактные провода с трапецидальными жилами (сечение показано на рис. 1)

	Electricite de France			Hydro-Quebec		
Проводник	AAAC/TW683	AAAC/АйроZ	Aster 570	AAAC/ TW566	Condor 403	ACAR/TW1010
Поперечное сечение						
Материал	Алюминиевый сплав	Алюминий+сталь	Алюминиевый сплав	Алюминиевый сплав	Сплав	Сплав и сталь

**Рис. 1. Изображение поперечного сечения исследованных проводов**

Новые провода позволили увеличить пропускную способность на 10%, что позволило снять определенное количество ограничений энергосистемы EDF.

В Hydro-Quebec повышение пропускной способности осуществлялось параллельно с увеличением проводимости, для чего было использовано двойное решение, в результате чего было достигнуто увеличение количества проводящего материала при сохранении диаметра провода. Таким образом, первый подход состоял в увеличении компактности обычных проводников с круглыми жилами, что позволило получить коэффициент заполнения 0,75. Затем было установлено, что использование жил специальной трапецеидальной формы обеспечило увеличение коэффициента заполнения до 0,93-0,94. Второе решение предполагало удаление стального сердечника, не обладающего достаточной проводимостью, и замена его сердечником, изготовленным из проводящего материала (рис. 1). Оба решения, можно надеяться, приведут к увеличению проводящего сечения, которое может потенциально достигнуть 40% и аналогичного увеличения проводимости.

Однако, стало очевидно, что заполнение пустот и сердечника из того же проводящего материала не может само по себе компенсировать удаление стального сердечника в отношении механической прочности проводов. Для этой цели следует использовать вместо обычно используемого в проводах чистого алюминия (марки 1350) алюминиевый сплав. Недостатки, очевидно, перевешивали потенциальное увеличение проводимости. Анализ показал, что стандартизованный в Канаде алюминиевый сплав 6101T83 является лучшим решением, поскольку его предельное разрывное напряжение оказалось таким, что механическая прочность провода либо достигала, либо превосходила механическую прочность наиболее прочных проводов, использованных Hydro-Quebec, а проводимость материалов снизилась менее чем на 6%.

Таблица 1

**Номинальные характеристики исследованных проводов**

Тип	Electricite de France			Hydro-Quebec		
	AAAC/TW	AAAC/AeroZ <sup>®</sup>	AAAC	AAAC/TW	ACAR/TW	ACSR
Назначение	TW683	AeroZ <sup>®</sup> 683	Aster 570	A4-Compact	A1/A4 Compact	A1/S1A
Марка алюминия	6200	6101 оптимизированный	6101	6101-T83	1350-H19/ 6101-T83	135-H19
Диаметр (мм)	31,05	31,05	31,05	27,8	37,1	27,73
Сечение алюминия (мм <sup>2</sup> )	683	683	570	566	1010	403
Удельная масса (кг/м)	1,878	1,878	1,574	1,558	2,797	1,521
Прочность на растяжение (кН)	229	171	183	141	189	127
Сопротивление постоянному току при 20°C (Ом/км)	0,0472	0,045	0,0582	0,0542	0,0293	0,0718
Поправочный коэф-т сопротивления пост. току	0,81	0,77	0,77	1,00	0,75	1,00

В таблице 1 приведены номинальные характеристики компактных проводов и сравниваются со свойствами обычного провода типа ACSR такого же диаметра и со стальным сердечником (сечение стали/к сечению алюминия) на уровне 13%. Из таблицы следует, что проводящее сечение увеличивается с 403 до 566 мм<sup>2</sup>, увеличивается на 40%, и электрическое сопротивление (при 20°C постоянному току) снижается на 25%, то есть с 0,0718 до 0,0542 Ом/км. На столько же снижаются тепло-



вые потери. Это также соответствует увеличению проводимости на 33% и, в первом приближении, 15% увеличению допустимой нагрузки по току. В дополнение, поскольку механическая прочность проводника возрастает на 11%, часть жил из сплава 6101T83 можно теоретически заменить жилами из алюминия-1350, что даст дополнительное увеличение проводимости на 2%.

Такой подход использовался при проектировании второго проводника, большего диаметра, который использовался для замены ACSR-проводника с 9% содержанием стали. В данном случае сплав 6101T83 использовался для центрального проводника и двух наиболее глубоких слоев, в то время как два наружных слоя были изготовлены из алюминия-1350. Предполагаемый рост проводимости составил 37% по сравнению с ACSR-проводником такого же диаметра. Другие номинальные характеристики проводов приведены в таблице 1.

## 6. ТЕХНИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА

Первый этап этого проекта состоял в разработке оптимальной конструкции провода и документальной оценке ожидаемых преимуществ. Указанные аспекты рассмотрены в предыдущем разделе. На втором этапе должны быть проиллюстрированы отобранные решения, то есть должно быть подтверждено, что новые провода продемонстрируют снижение тепловых потерь и соответствующее увеличение допустимой токовой нагрузки. Демонстрация отобранных решений также предполагает установление того, что прочие характеристики новых проводов были приемлемыми в любом случае. С этой целью EDF и Hydro-Quebec инициировал широкую совместную программу испытаний рассчитанную на оценку, в дополнение к электрическим и тепловым характеристикам новых проводов, термического старения соединений, их общего механического поведения, удлинения, способности к подвешиванию, коэффициента аэродинамического сопротивления, а также чувствительности и сопротивлению вибрации проводов под действием ветра.

Для корректного определения свойств новых проводов и облегчения интерпретации результатов было согласовано, что большая часть испытаний будет проводиться на сравнительной основе, с использованием одного или двух компактных проводов и одного обычного провода с круглыми проволоками одинакового наружного диаметра. Как показано в таблице 1 и на рисунке 1, провода, которые были отобраны EDF: AAAC/TW 683 из сплава с проводящими жилами трапецеидальной формы, AAAC/AeroZ 683 с проволоками Z-образного профиля, Aster 570 с круглыми проволоками. Провода, отобранные для Hydro-Quebec: Condor ACSR-типа с круглыми проволоками, которые использовались в качестве опорных для компактного провода AAAC/TW 566 идентичного диаметра с трапецеидальными проволоками и целиком изготовленных из сплава 6101T83. Другой компактный провод того же диаметра, ACAR/TW 1010, являлся исключением и не будет упоминаться в оставшейся части настоящей статьи.

### 6.1. Электрические и тепловые характеристики

Для получения данных о термической стойкости и стреле провеса проводники испытывались на 200-метровой испытательной линии, установленной на испытательной площадке в городе Ренардье (Renardieres) при исследовательском центре EDF. Испытания проводились для проверки возможности увеличения допустимой токовой нагрузки, которое было достигнуто за счет использования новых проводов для нормальной и пиковых нагрузок.

В процессе этих испытаний проводились также различные измерения, служившие для калибровки математических моделей, разработанных для новых проводов. С теплотехнической точки зрения было показано, что использовавшаяся для проводов с круглыми проволоками, математическая модель наилучшим образом подходит для проводов с гладкой поверхностью при низких скоростях ветра, используемых для оценки допустимой токовой нагрузки, где была отмечена хорошая корреляция между расчетами и измерениями. В отношении натяжения и стрелы провиса компактного провода при сравнении со стандартными проводами различия не выявлены.

Испытание на долговечность проводов с круглыми проволоками проводилось в соответствии со стандартом NFC-66800. Только один обыкновенный провод не прошел испытаний, все остальные соответствовали требованиям.

## 6.2. Общее механическое поведение

Эти испытания проводились для проверки предела прочности при растяжении, и определения поведения концевых и соединительных участков проводов при воздействии на них растягивающих усилий. Все провода выдержали испытания. Разрушение проводов произошло при нагрузках значения, которые превышали значения приведенные в стандартах NFC 34-125 и IEC 1089.

## 6.3. Удлинение проводника

Для проведения этих испытаний (которые обычно не проводятся), EDF использовала два стенда для испытаний на удлинение; первый работал при температуре 20°C, второй допускал регулировку температуры в пределах от 20 до 100°C. Проведены различные виды испытаний, в том числе одно в соответствии со стандартом IEC 1345. Компактные провода показали поведение, одинаковое с используемыми в настоящее время проводами.

## 6.4. Способность к подвешиванию

Провода подвергались циклическим изгибающим нагрузкам, которые помогли симитировать напряжения, возникающие в процессе натяжения и подвешивания проводов, и использовались для оценки состояния наружных слоев гладких проводов. Испытания проводились на станции SENS лабораторий EDF. Также проводились испытания обычных проводов.

Провода с круглыми проволоками выдержали испытания. Однако наружный слой одного из компактных проводов был немного поврежден.

## 6.5. Коэффициент аэродинамического сопротивления

Все испытания, которые были связаны с сопротивлением ветровым нагрузкам проводов проводились в аэродинамической трубе сечением 2 x 3 м Национального исследовательского центра в Оттаве. Эти испытания проводились с использованием полномасштабных моделей, изготовленных из последнего повива проволок каждого из проводов, туго намотанных на стальной сердечник.

Как показано на рисунке 2, каждая кривая, представляющая коэффициент аэродинамического сопротивления ( $C_d$ ) в функции от скорости ветра и имеет следующие особенности: на первом участке при малых скоростях ветра имеется плато в диапазоне значений  $C_d$  от 1,1 до 1,3; следом идет четко выраженный спад, завершающийся минимальным значением  $C_d$ , а затем медленный рост при более высоких скоростях ветра. Испытания показали, чем глаже проводник, то минимальное значение  $C_d$  отмечается при более высоких скоростях ветра.

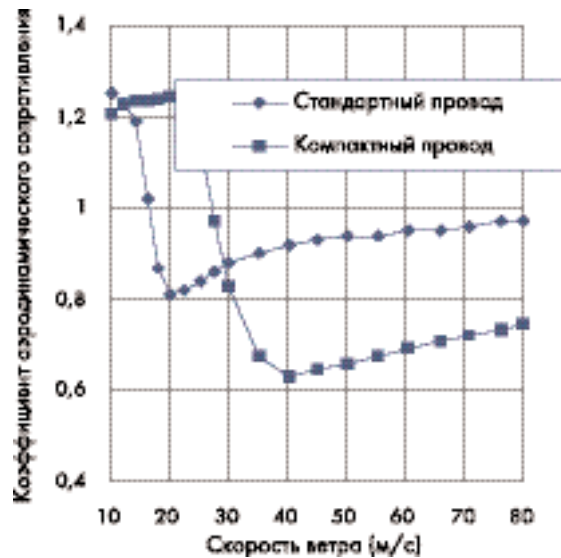


Рис. 2

Коэффициенты аэродинамического сопротивления для компактного провода и стандартного провода

В приведенном на рисунке 2 стандартный провод с круглыми жилами имеет минимальное значение  $C_d$  на уровне 0,8 при скорости 20 м/с; в то время как более гладкий компактный проводник имеет меньшее значение  $C_d = 0,63$ , но при скорости 37 м/с. Однако характерные для каждого провода кривые пересекаются примерно при 28 м/с, и компактный провод демонстрирует меньшие значения  $C_d$  при больших скоростях.

## 6.6. Восприимчивость и сопротивление ветровым нагрузкам

Восприимчивость проводов к вызванным ветром вибрациям определяется двумя основными факторами: их способностью воспринимать энергию ветра, передаваемую низкочастотными вихревыми потоками, и их способностью рассеивать эту энергию, которая определяется их параметрами самозатухания. Сопротивление проводов аэродинамическим вибрациям определяется их способностью выдерживать такие вибрации, то есть их усталостной долговечностью. Для оценки передачи энергии ветра различными проводами специальные испытания не проводились, поскольку предполагалось, что гладкость наружной поверхности оказывает незначительное воздействие на такую передачу. Однако считалось важным, что провода характеризуются их демпфирующей способностью, общей восприимчивостью к вызываемым ветром вибрациям и усталостной долговечностью.

Измерение демпфирования проводилось для каждой линии при 15, 20 и 25% от предела прочности при растяжении соответственно.

Испытания проводились на 60-метровом, находящемся в помещении, пролете IREQ с использованием эффекта обратной стоячей волны (ISWR) [5], который полностью исключает концевые эффекты. В дополнение к этому, цель состояла в оценке конструкционного демпфирования, и результаты были откорректированы для исключения аэродинамического демпфирования, которое может преобладать на более низких частотах.

Восприимчивость различных проводов к вызванным ветром вибрациям оценивалась в условиях естественных ветров на испытательной линии Hydro-Quebecs в г. Варен (Varenes) [6]. Шесть установленных параллельно проводов были подвергнуты трем последовательным сериям испытаний, каждая из которых длилась шесть недель вслед за установленными процедурами [7]: Первая с проводами, натянутыми до 15% от предела прочности без использования каких-либо противовибрационных

устройств, вторая с проводами, натянутыми до 20% от предела прочности с использованием противовибрационных устройств (гибкие перемычки для EDF и демпферы Стокбриджа для Hydro-Quebec) и, последняя третья с проводами, натянутыми до 25% от предела прочности сначала без использования каких-либо противовибрационных устройств, а затем с их использованием.

Например, на рисунке 3 показан график, отражающий границы диапазонов максимальной амплитуды изгиба, зафиксированной в подвесных зажимах на компактном проводе и на соответствующем стандартном проводе, причем каждый из них не снабжен противовибрационным устройством, при растягивающем усилии 15% от предела прочности при растяжении. Можно наблюдать, что уровни вибрации на компактном проводе составляют примерно половину отмечаемых на стандартном проводе. Вибрации таковы, что новый провод не требует применения каких-либо противовибрационных устройств, что нельзя сказать о стандартном проводе.

Вообще говоря, характер вибраций незащищенных проводов на испытательной линии адекватно отражает установленные в лаборатории демпфирующие свойства. Также было показано, что компактные провода могут быть защищены стандартными противовибрационными устройствами, (гибкими перемычками или демпферами Стокбриджа) как и обычные провода.

Другая важная характеристика способности провода противостоять ветровым нагрузкам, усталостная прочность, была установлена на испытательных стендах Университета Лавэ в Квебек-Сити.

Девять образцов проводов каждого типа испытывались в диапазоне амплитуд от 0,2 до 1,3 мм с количеством циклов до 100 млн. На рисунке 4 показаны результаты первых трех разрушений компактных проводов. Выраженная в количестве циклов усталостная долговечность экспоненциально уменьшается с увеличением амплитуды колебаний, как и в случае обычных проводов с круглыми проволоками. Усталостная прочность, соответствующая средним значениям, при большом количестве циклов оценивается в данном частном случае при значении полной амплитуды 0,25 мм, которое соответствует аналогичному стандартному проводу.

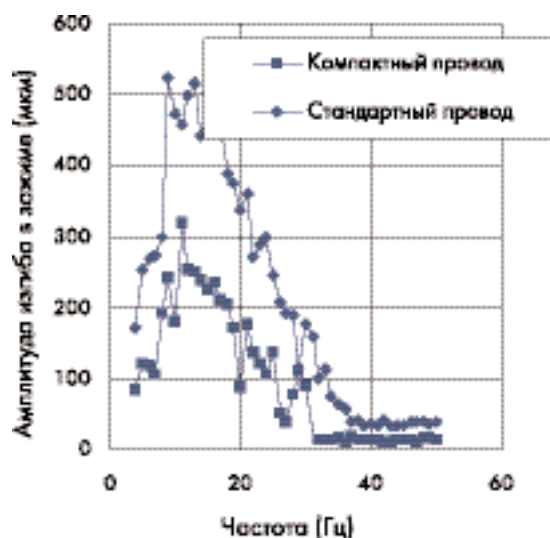


Рис. 3

График, отражающий границы диапазонов максимальной амплитуды изгиба, зафиксированной на компактном и стандартном проводе

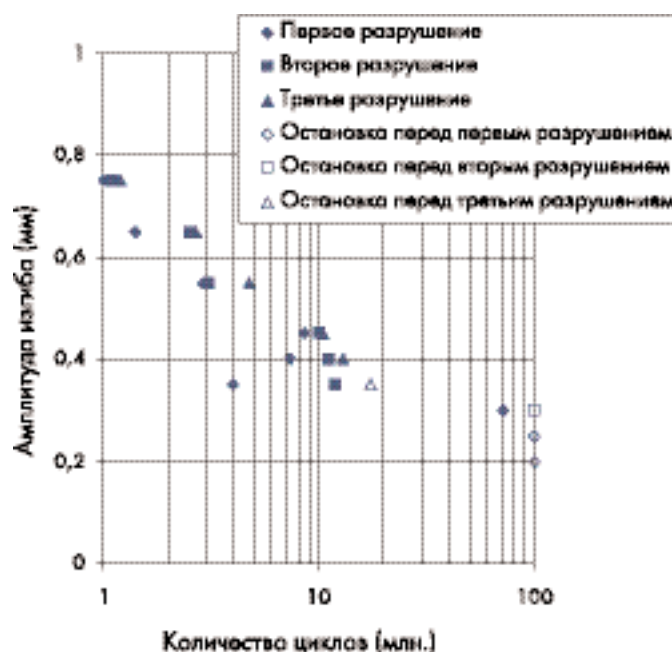


Рис. 4

Пример усталостной долговечности компактного провода

## 7. АНАЛИЗ ЗАТРАТ И ПРЕИМУЩЕСТВ

Проведенный EDF анализ затрат и преимуществ выявил выгоду от использования компактных проводов как для новых линий, так и для уже установленных. Сделанные до 2010 года прогнозы показывают, что увеличение допустимой токовой нагрузки, обеспеченное новыми проводами (10% при нормальной электрической нагрузке и 16% при пиковой), позволит снять ряд ограничений.

Дополнительная себестоимость изготовления частично компенсируется снижением затрат на тепловые потери (за счет уменьшения сопротивления).

Hydro-Quebec, со своей стороны, находится в процессе проведения анализа затрат и выгод, предназначенного для выработки руководящих указаний для выбора провода в соответствии с линейным напряжением и с учетом следующих условий: создание новых линий или увеличение их пропускной способности, либо замена проводов вследствие их морального износа.

Однако компания провела аналогичный анализ с целью оценки себестоимости своего проекта научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по компактным проводам. Совместно с компанией-производителем проводов было установлено, что при одинаковой проводимости стоимость рассматриваемых Hydro-Quebec компактных проводов в основном равна стоимости обычных ACSR-проводов. Тогда было установлено, что новые линии требуют оптимальной проводимости, что основано на минимизации суммарной покупной цены проводов и неудовлетворительного в настоящее время уровня тепловых потерь с учетом оценки согласно сроку предполагаемого ресурса этих линий. Выбор компактных проводов, а не обычных для того чтобы получить оптимальную проводимость приводит к уменьшению их диаметра на 10–13%. На этом основании было показано, что компактные провода могут доказать правомерность того факта, что они являются наиболее уместным решением для новых линий с номинальным напряжением 69 и 120 кВ, но не для линий на напряжение 161 и 230 кВ, поскольку их меньший диаметр является недостатком из-за эффекта короны.

Принимая во внимание, что преимущества компактных проводов для новых линий обычно обусловлены их меньшим диаметром и, следовательно, сниженным аэродинамическим сопротивлением, то же самое неприменимо к существующим линиям, где, при одинаковом диаметре преимущества обусловлены увеличением их пропускной способности и меньшим электрическим сопротивлением (что влечет за собой меньшие тепловые потери). В части анализа затрат и выгод проекта научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ был сделан вывод о том, что компактные провода будут наилучшим образом подходить как для полной замены проводов на напряжение 69 и 120 кВ, так и, при сложных природных условиях, на линиях на напряжение 161 и 230 кВ. Более того, предполагалось, что 50% всех замен будут являться следствием увеличения пропускной способности.

В таблице 2 приведены значения годового увеличения протяженности ЛЭП и годовые значения скорости замены проводов на существующих линиях напряжением 69–230 кВ, как текущий прогноз планировщиков энергосистем. Следовательно, вопреки до некоторой степени ограничивающей гипотезе и консервативным прогнозам в отношении возможной установки компактных проводов было показано, что доход от реализации научно-исследовательского и конструкторского проекта с высокой вероятностью в 26 раз превысит начальное капиталовложение. Период окупаемости инвестиций, являющийся следующим показателем технико-экономической эффективности, оценивается в среднем в 2,5 года, что весьма примечательно.

Таблица 2.

### Прогноз Hydro-Quebec о замене проводов на ЛЭП напряжением 69–230 кВ

Напряжение, кВ	Длина ЛЭП, км	Новые линии, %% в год	Замена, %% в год
69	3800	0,3	0,3
120	1700	0,6	0,6
161	8100	1,0	0,2
230	2700	0,5	1,0

## 8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В общем случае испытания, проведенные как часть данного анализа, показали, что компактные провода часто имеют превосходящие или эквивалентные рабочие характеристики по сравнению с традиционными проводами с круглыми проволоками. Результаты испытаний подтверждают прогнозы в отношении электрических и тепловых параметров новых проводов: при равных диаметрах в условиях постоянной нормальной эксплуатации имеется прирост допустимой нагрузки по току от 7 до 16% и, как следствие, снижение тепловых джоулевских потерь на 13 – 26%.

Коэффициент аэродинамического сопротивления компактных проводов снижается на 25– 50% по сравнению с обычными проводами при воздействии ветра с высокой скоростью. Фактически, чем больше диаметр проводов, тем ниже граница скорости ветра, при которой они становятся более аэродинамичными.

Механическая прочность, возможность соединения и подвешивания также удовлетворительны. Стойкость к ветровым нагрузкам временами значительно ниже, в худшем случае эквивалентна. Удлинение и усталостная прочность эквивалентны обычным проводам.

И, наконец, хотя это и является обычно не проверяемым положением, можно ожидать, что компактные провода менее подвержены обледенению по той причине, что они обладают более высокой жесткостью при кручении и сбрасывают лед более легко благодаря их более гладкой наружной поверхности.

По мере того, как будет удостоверена их техническая и экономическая эффективность, эти провода будут со временем испытаны в сети ЛЭП Франции. Будут также разработаны функциональные требования. Все, что останется сделать – это создать номенклатуру проводов, которые со временем заменят имеющиеся.

## 9. ВЫРАЖЕНИЕ ПРИЗНАТЕЛЬНОСТИ

Авторы выражают искреннюю признательность за вклад, обеспечивший успех проекта, отдельным коллегам, в особенности представителям Дирекции по изучению и исследованиям EDF (direction Etudes et Recherche), Hydro-Quebec, Исследовательского института (Research Institute), машиностроительного факультета Университета Лавала (Universite Laval), лаборатории аэродинамики Национального исследовательского совета (National Research Council), Alcatel Cable, Aluminium Pechiney, Alcan Cable и Southwire Company.

## ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА:

[1] CIGRE SC22-12, Вероятностный анализ тепловых свойств проводников– «Determination probabiliste de la capacite thermique des conducteurs,» Electra No. 164 стр. 102-119.

[2] I. Oogi, T. Ito, H. Uino, N. Hase, H. Matuo, K. Takeda, «Провода для воздушных ЛЭП Японии», Коллоквиум по вопросам воздействия воздушных ЛЭП на окружающую среду, Введение в технологии воздушных ЛЭП в Японии, совещание CIGRE SC22, Сендай, Япония, 20 октября, 1997г.

[3] J.M. Michalak, «Повышение пропускной способности существующих воздушных ЛЭП», труды конф. Power Delivery 97 Europe, Мадрид, стр. 411-420.

[4] J.L. Bousquet, B. Loreau, D. Bechet, J.C. Delomel, Новые компактные однородные провода из алюминиевого сплава для ЛЭП 400 кВ– «Un nouveau conducteur compact homogene en alliage d'aluminium pour les lignes 400 kV,» Ревю REE, ноябрь 1997, сс. 13 и 14.

[5] CIGRE SC22 – Рабочая группа по механическим колебаниям, Руководство по измерению самозатухания колебаний проводов– «Guide on Conductor Self-Damping Measurements,» Electra No. 62, январь 1979, стр.79-90.

[6] P. Van Dyke, C. Hardy, M. St-Louis, J.L. Gardes, Сравнительные полевые испытания различных методов контроля вызванного ветром движения проводов– «Comparative Field Tests of Various Practices for the Control of Wind-Induced Conductor Motion,» труды IEEE по энергоснабжению, т. 12, № 2, апрель 1997.

[7] S. Houle, C. Hardy, A. Lapointe, M. St-Louis, Экспериментальная оценка характеристик дистанционных распорок-гасителей вибрации (между проводами расщепленной фазы линий сверхвысокого напряжения )– «Experimental Assessment of Spacer-Damper System Performance on Wind-Induced Vibrations of High Voltage Transmission Lines,» Совместная конференция IEEE/CSEE по высоковольтным системам электропередач, No. 87JC-39, 1987.





