

## ПІДВИЩЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕСИЛАННЯ ТА ЗАСТОСУВАННЯ ПРОВІДІВ НОВИХ МАРОК

© Бінкевич Т.В., 2012

**Розглянуто проблеми підвищення пропускної здатності повітряних ліній електропересилання та використання проводів нових марок.**

**Ключові слова:** *повітряні лінії електропересилання, пропускна здатність, проводи нових марок.*

**The problems of increasing bandwidth overhead lines and the use wires of new brands.**

**Key words:** *Transmission line, the bandwidth, the wires of new brands.*

### **Актуальність проблеми. Аналіз світового досвіду**

Швидке зростання споживання електроенергії потребує модернізації електричної мережі, зокрема підвищення пропускної здатності ліній. Можливості прокладання нових ліній обмежуються економічними та соціальними аспектами – збільшенням вартості землі під траси ліній, потребою електропостачання міст і великих підприємств з щільною забудовою і високими вимогами до безпеки населення. Передають великі обсяги енергії лініями класу напруги не нижче 110 кВ, надалі йтиметься саме про такі лінії.

Найприйнятніший з цих міркувань варіант – підвищення пропускної спроможності наявних ліній електропересилання. Це завдання виконується як поліпшенням використання ліній: підвищенням робочих напруг, навантажень на проводи, так і застосуванням додаткових технічних засобів: компенсаторів реактивної потужності, пристроїв розподілу потоків потужності в мережі, гнучкого управління режимами роботи ліній змінного струму.

### **Формулювання цілі статті**

Метою статті є аналіз методів підвищення пропускної здатності повітряних ліній електропересилання, а також огляд проводів нових марок.

### **Виклад основного матеріалу**

Основними можливостями підвищення пропускної здатності ЛЕП є:

- Підвищення напруги лінії (може бути пов'язано з заміною ізоляторів і зміною розміщення проводів для дотримання необхідних повітряних проміжків між ними і землею).
- Збільшення перерізу проводу (зазвичай, пов'язано з посиленням опор та ізоляторів).
- Підвищення навантаження лінії з урахуванням реальних погодних умов по трасі за середньостатистичними даними для цієї зони, або за реальними температурами і провисанням проводів, вимірюваними безперервно в критичних точках.
- Підвищення навантаження за рахунок підвищення температури проводів – використання нових типів проводів підвищеної нагрівостійкості.
- Забезпечення необхідної відстані до землі при підвищенні температури проводу – збільшення висоти підвісу і застосування проводів великої механічної міцності і малого теплового подовження [1–3].

## Порівняння деяких проводів поліпшених характеристик із звичайним сталелеюмінієвим проводом ACSR

Провід	Виробник	Номинальний робочий струм	Ціна	Довжина проводів, км
ACSR	Багато країн	1	1	>0.8 млн
ACSS	США	1.8–2.0	1.2–1.5	54000
GTACSR	Японія	1.6–2.0	2	10000
ACIR	Пд. Корея	1.5–2.0	3–5	20000
ACCR	США	2–3	5–6.5	800
ACCC	США	2	2.5–3.0	1900

Розглянемо найхарактерніші види проводів з підвищеною нагрівостійкістю і зниженою усадкою, застосування яких дозволяє істотно збільшити пропускну здатність ПЛ без зміни їх опор, фундаментів та ізоляторів.

В основі таких розробок – застосування матеріалів, що витримують без старіння підвищені робочі температури, високоміцних матеріалів і матеріалів, що мають знижений коефіцієнт температурного розширення [4, 5].

Короткий опис проводів, які застосовуються для ЛЕП, наведено в таблиці.

Найпоширеніший в світі провід для повітряних ліній передавальних мереж – сталелеюмінієвий, типу ACSR (в Україні – марка АС).

### ACSR (Aluminum Conductor Steel Reinforced)

У проводі ACSR сталеве осердя оточене шарами алюмінієвого дроту (рис. 1, а) і несе основне механічне навантаження. Вища допустима температура (90–100 °С) обмежується старінням алюмінію.

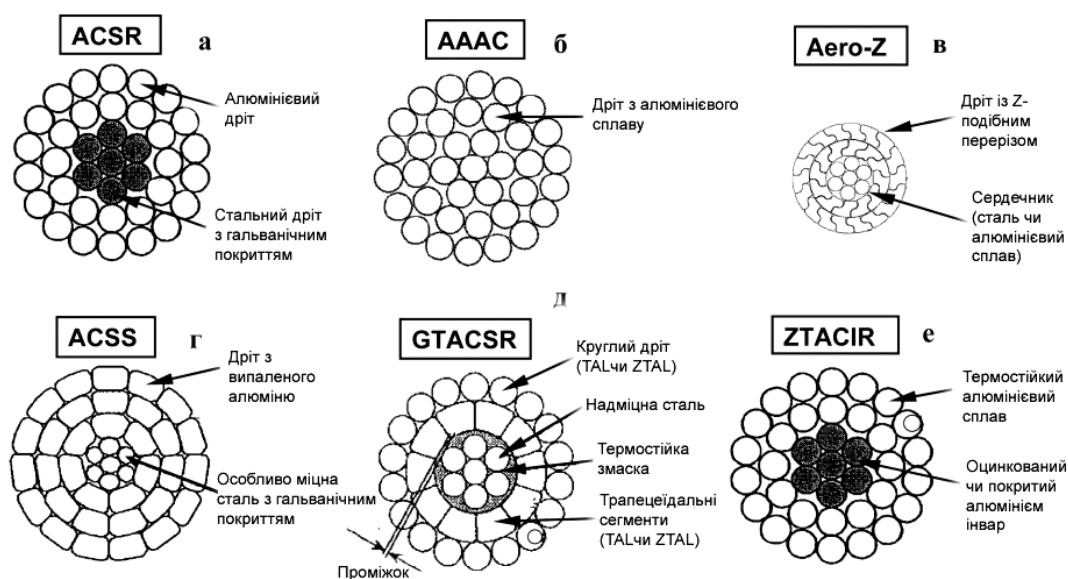


Рис. 1. Перерізи основних типів проводів

Переваги: хороше відношення «міцність/вага», нагрівостійкість, низька вартість, добре освоєні методи підвіски.

Недоліки: порівняно низька робоча температура, корозія сталевого осердя.

Варіант ACSR/AW – сталевий дріт сердечника – з гальванічним покриттям для кращого опору корозії і деякого зниження опору дроту.

Варіант ACSR/TW – алюмінієві дроти мають трапецієподібний переріз, що дає змогу збільшити навантаження по струму при тому ж робочому перерізі дроту.

Межа навантаження за провисанням проводу в прогоні визначається осердям, у якого коефіцієнт лінійного розширення сталі вдвічі менший, ніж у алюмінію. Зазвичай робоча температура сталевалюмінієвого дроту не перевищує 75 °С, термостійкі проводи дозволяють підняти температуру до 120 °С, а короткочасно – до 200 °С.

Вітчизняний провід (марка АС) використовує дріт з твердого алюмінію АТ і осердя з оцинкованого сталевих дроту.

Варіант проводу AACSR має таку ж конструкцію, як ACSR, але провідна частина виконана з алюмінієвого сплаву підвищеної провідності, варіант ACAR має сердечник з алюмінієвого сплаву.

Перевага цих варіантів: вища провідність і відповідно вище струмове навантаження порівняно з ACSR.

Недоліки: провід трохи дорожчий, ніж ACSR, порівняно мала максимальна робоча температура (80 °С), у проводу ACAR – менша міцність на розрив порівняно з ACSR.

#### AAAC (All Aluminum Alloy conductors)

Провід цього типу складається з концентричних шарів дротів з алюмінію або алюмінієвого сплаву високої міцності – сплаву 6201 T81 Al-Mg-Si (рис. 1, б). Дріт круглий або трапецієподібний (тип AAAC/TW). Інші фірмові найменування- AAC і AMS.

Переваги: висока провідність, висока корозійна стійкість.

Недоліки: велике провисання, мала міцність, порівняно низька робоча температура.

Завдяки високій корозійній стійкості часто застосовується на лініях в приморських зонах. Виробляється в багатьох країнах, найбільший обсяг виробництва – компанія BICC (Великобританія). Вітчизняний провід аналогічної конструкції (марки А) має дріт з твердотягнутого алюмінію АТ.

#### Aero-Z (різновид дроту AAAC)

Провід типу Aero-Z має один або кілька концентричних шарів круглих дротів (внутрішні шари) і тісно пов'язаних між собою дротів у вигляді літери «Z» (зовнішні шари) (рис. 1, в). Дроти з алюмінієвого сплаву. Кожен шар проводу має скрутку по довжині, виконану з певним кроком. Осердя можна виконувати як зі сталевих, так і алюмінієвих дротів. Розробник дроту – концерн Nexans. Ефективніше використання перерізу алюмінію (за того ж зовнішнього діаметра – на 20 % більше) знижує втрати в проводах, гладка поверхня знижує вітрові навантаження на 30–35 %, перешкоджає налипанню снігу та ожеледі. Менша погонна вага зменшує навантаження на опори і дозволяє збільшити довжину прогону на 10%.

#### ACSS (Aluminum Conductor, Steel-Supported)

Конструкція проводу така ж як у ACSR. Варіанти виконання дроту – звичайна кругла або трапецієподібні сегменти (ACSS/TW). Алюміній – відпалений, осердя – з особливо міцної сталі (рис. 1, г). При тій же вазі, розмірах проводу й провисаннях в прольоті ACSS несе вдвічі більше навантаження, ніж ACSR за рахунок підвищення робочої температури і зменшення провисання проводу в прольоті. Застосовується з початку 70-х років минулого століття, до 2008 р. в США було змонтовано понад 5000 км цього проводу. Покриття зі сплаву Bezial (95 % Zn і 5 % Al) компанії Bekaert надає сталевому дроту осердя проводів корозійну стійкість в 2,5–3 рази вищу, ніж у оцинкованого дроту.

#### (Z) TACSR (Aluminum-Zirconium Alloy Conductor, Steel-Reinforced)

Провід TACSR аналогічний за конструкцією ACSR (рис. 1, а), і має таке ж провисання, але його струмопровідні частини дроту виконані з термостійкого алюмінієвого сплаву TAL або сплаву «алюміній-цирконій» ZTAL, що дає змогу працювати при температурах до 150 °С або до 210 °С.

Переваги цих проводів: висока максимальна робоча температура (150–210 °С). Вже при 150 °С лінія може нести навантаження в 1,5 рази більше ніж з проводом ACSR, що працює при 80 °С.

Недоліки: високий рівень провисання за високих температур.

Випускають японські компанії.

#### G (Z) TACSR (Gap-Type Thermal-Resistant conductor)

Провід GTACSR має проміжок між сталевими дротами сердечника і дротами з алюмінієвого сплаву (рис. 1, д). Проміжок заповнюється термостійким мастилом, що знижує тертя сердечника об

провід і захищає сердечник від вологи. Це дозволяє розвантажити провід, який має менший, ніж сталь, коефіцієнт розширення від зусиль розтягнення.

Провід G (Z) TACSR має струмопровідні дроти зі сплаву алюміній-цирконій, що дає велику нагрівостійкість.

Переваги: висока максимальна робоча температура (150–180 °C), високе навантаження за струмом, мале провисання завдяки меншому коефіцієнту розширення, високий модуль пружності, висока міцність на розрив.

Недоліки: високе навантаження ожеледдю через порівняно великий діаметр, техніка підвіски і з'єднання відмінні від ACSR.

Провід з проміжком навколо осердя в обмеженому обсязі застосовують в США, в Японії, також провід застосовується для заміни проводу ACSR на багатьох ПЛ країни.

#### (Z) TACIR (Thermal-Resistant Aluminum Conductor Invar Reinforced)

Конструкція проводу показана на рис. 1, е, вона подібна до ACSR, але дроти провідної частини – з алюмінієвого сплаву TAL, для особливої нагрівостійкості – сплаву з цирконієм ZTAL (варіант ZTACIR). Сердечник дроту не зі сталі, а з інвара, сплаву Fe-Ni, який має порівняно зі сталлю міцність нижче на 15–20 %, але його температурний коефіцієнт розширення в чотири рази менший, ніж сталі і прогони з таким проводом мають знижене провисання. Дроти сердечника мають гальванічне покриття.

Переваги цих проводів: висока максимальна робоча температура (для TAL 150 °C, для ZTAL 210 °C) і мале провисання за високих температур.

Недолік: низька міцність на розрив порівняно з ACSR.

Проводи TACSR і TACIR застосовуються переважно в країнах Азії.

#### (T) ACFR (Aluminium Conductor Carbon Fiber Reinforced)

Провід ACFR має конструкцію, подібну до TACIR (рис. 1, е), але осердя виконане з синтетичної смоли, армованої скловолокном. Сердечник проводу розширюється в 10 разів менше від сталі. Міцність такого осердя – дві третини від міцності сталі, зате вага проводу на 30 % менше від ваги ACSR. Дроти провідної частини виконуються як із звичайного алюмінію, так і з нагрівостійкого алюмінієвого сплаву TAL (Т), відповідно робочі температури – до 100 і до 150 °C.

Переваги: мале провисання, високе навантаження за струмом, можливість роботи при високих температурах.

Недоліки: недостатньо випробувана технологія, немає інформації про застосування.

Виробники – компанії Showa Electric (Exsym) і CTC. Дослідне застосування розпочато з 2002 р. в північній Японії.

#### 3M ACCR (Aluminum Conductor Composite Reinforced)

Провід ACCR виробництва корпорації 3M має композитне осердя, кожен дріт якого складається з декількох тисяч волокон  $Al_2O_3$  в алюмінієвій матриці. Композитне осердя має мале лінійне розширення і більшу міцність, ніж у сталі з гальванічним покриттям. Осердя може бути меншого діаметра, ніж у ACSR, що дозволяє підвищити переріз алюмінію і знизити загальний опір дроту. Подальше підвищення перерізу дає виконання дротів провідної частини з трапецеїдальним перетином. Проводи – з нагрівостійкого сплаву ZTAL. Конструкція аналогічна до TACIR, але сердечник – з композиту.

Переваги: висока міцність на розрив, висока максимальна робоча температура (210–240 °C), високе навантаження по струму, мале провисання, звичайна техніка підвіски.

Недоліки: нова розробка, невідпрацьована технологія, незначний досвід експлуатації, обтяжена арматура для підвіски через вимоги нагрівостійкості.

Характеристики дроту 3M ACCR вважаються прикладом найвдаліших рішень.

- Міцність композитного осердя порівняно зі сталевим в 8 разів вища від алюмінієвого.
- Маса композитного осердя в два рази менша від сталевого і всього на 20 % більша від маси чистого алюмінію.
- Електропровідність осердя ACCR в 4 рази вища від сталевого.

- Коефіцієнт теплового розширення в 4 рази менший від алюмінієвого і в 2 рази менший від сталевого.
- Жорсткість в 3 рази вища від алюмінієвого осердя.

Якщо звичайний алюміній при температурі 120–150 °С відгорає і різко втрачає міцність, то сплав  $Al_2O_3$  зберігає свої властивості до 210 °С, в режимі короткочасних навантажень – до 240 °С. Провід може підвищувати пропускну здатність ПЛ в 1,5–3 рази, при цьому маса дроту – менша. Виробник – компанія 3М, провід проходить випробування на окремих лініях в 20 енергокомпаніях (Початок 2009 р.).

#### АССС / TW (Aluminum Conductor Composite Core)

Провід АССС виробництва компанії СТС аналогічно проводу АССР має композитне осердя. Полімерне осердя, армоване вуглецевими волокнами і поміщене в скловолоконну трубку, являє собою стрижень як єдине ціле. Дроти провідної частини виконуються трапецеїдальними з випаленого алюмінію. Порівняно зі звичайним дротом АСРСР міцність АССС/ТW в півтора рази більша при тому ж діаметрі. Коефіцієнт лінійного розширення композитного осердя в 4 рази менший, ніж у сталевого осердя АСРСР, завдяки чому в шість разів менше зростання провисання проводу при високих температурах за того ж значення струму. Максимальна робоча температура 210–240 °С.

Переваги цього проводу ті ж, що у проводу АССР – міцність, нагрівостійкість, мале провисання; загальний же недолік цих типів – вони поки перебувають у стадії перевірки робочих можливостей. Провід типу АССС / ТW випускають корпорації СТС (США) і Exsym (Японія).

#### *Досвід застосування проводів різних типів*

Найпоширеніші ПЛ зі сталю-алюмінієвими проводами АСРСР. Багато з цих ліній проектувались на термін служби 40 років, а працюють вже по 50–70 років. У США і Канаді 80 % ПЛ працюють з такими проводами.

Під час спорудження нових ліній і особливо під час реконструкції наявних здебільшого економічно доцільне застосування термостійких проводів і проводів з малим провисання. Приклад тому – широке застосування в Північній Америці проводів АССС, що має сердечник із сталі дуже високої міцності і провідного проводу з відпаленого алюмінію. Досвід його застосування з 70-х років минулого століття показує, що при тому ж обсязі догляду за проводами і очікуваному терміні служби навантажувальна здатність дроту АССС може бути вдвічі більша, ніж у АСРСР. Провід застосовується з початку 70-х років минулого століття. До 2008 р. в США було змонтовано понад 5000 км АССС.

Заміна існуючих проводів на термостійкі з малим провисанням дозволяє істотно підвищити термічну межу роботи дроту при тій же вазі і погодних умовах. Безперервна робота з температурою проводу до 200 °С без вимірювання механічних та електричних параметрів, різке зниження подовження проводу за температур вище 100 °С дозволяють підвищити пропускну здатність ПЛ на 50 % без заміни структури лінії (опор, фундаментів, системи підвіски та ізоляторів).

Загальний недолік роботи проводів з підвищеними температурами – підвищення втрат в лінії; можливі варіанти, коли капіталізовані втрати за весь період роботи лінії є основним фактором під час вибору типу проводу, може бути навіть прийнято рішення про застосування проводу більшого перерізу з реконструкцією опор. Взагалі вибір застосовуваного типу дроту визначається техніко-економічними розрахунками для лінії загалом.

Наприклад, проведені в університеті Eindhoven в Нідерландах розрахунки вартості реконструкції ПЛ 150 кВ 600 А з підвищенням навантаження до 1200 А показали, що економічніший є варіант з проводами типу АССС, що мають композитне осердя. Витрати на реконструкцію плюс втрати за весь термін служби за розрахунками становлять 50–70 % від варіантів з проводами інших марок, зокрема і звичайного сталю-алюмінієвого дроту АСРСР, незважаючи на те, що провід АССС в 2,5–3 рази дорожчий. Вирішальними стали два фактори – можливість використання наявних опор і відносно малі втрати в лінії, що знижують їх накопичену капіталізовану частину за весь термін служби лінії [6].

Широке застосування знайшли алюмінієві проводи АААС, що мають знижені втрати і високу стійкість до корозії порівняно з проводами із сталевим осердям. Їх можна виконувати з трапецеїдальними дротами (TW), при цьому значно поліпшуються аеродинамічні якості дроту, а зниження ваги (алюміній замість сталі в осерді) дозволяє знизити навантаження на опори. Ще більший ступінь заповнення перерізу проводу у проводу Аеро-Z, який має тісно розташовані Z-подібні дроти. Цей провід набуває все більшого поширення, особливо для тих трас ПЛ, де сильні вітрові навантаження, снігопади і ожеледь. Нині в Європі прокладено близько 3500 км ліній з такими проводами.

В Японії, де майже неможливе прокладання нових ліній, близько 70 % ПЛ використовують термостійкі проводи (десятки тисяч км). У США – близько 10 000 км таких ПЛ (2007 р.).

Провід з осердям з інвара або композиту, з проміжком між осердям і струмопровідними дротами випускаються в менших кількостях і використовуються переважно в країнах Азії.

Проводи з осердям з композиту, розроблені в США, проходять випробування на окремих лініях.

Ціни на дроти з високою нагрівостійкістю і зниженою величиною провисання доволі різні. Завдяки порівняно невеликій націнці щодо АСРС (в 1,5–2 рази) найпоширеніший є провід АСРС, який випускають у США три підприємства.

Ціна на дріт залежить від матеріалу осердя і струмопровідних дротів – японські нагрівостійкі алюмінієві сплави ТАЛ і ZТАЛ коштують втричі дорожче від звичайного алюмінію.

Інвар втричі дорожчий від звичайної сталі з гальванопокриттям, тому дроти G (Z) ТАСРС в два–три рази дорожчі АСРС, а дроти ZТАСРС – більше ніж втричі.

Матеріал осердя проводу АСРС компанії ЗМ (осердя з керамічних волокон в алюмінієвій матриці) більш ніж в 10 разів дорожчий від звичайної сталі. Оскільки цей провід також використовує сплав «алюміній-цирконій», він може бути дорожчий АСРС до 30 разів залежно від матеріалу осердя.

Вироблені компаніями СТС і Exsum проводи мають осердя з нагрівостійкої смоли, армованої вуглецевими волокнами. Проводи компанії СТС мають жили з відпаленого алюмінію і коштують в 2–3 рази дорожче від АСРС; дроти Exsum, що мають жили з алюміній-цирконієвого сплаву ZТАЛ, коштують в 3–5 разів дорожче від АСРС.

На рис. 2 показані характеристики «температура-провисання» для різних типів проводів.

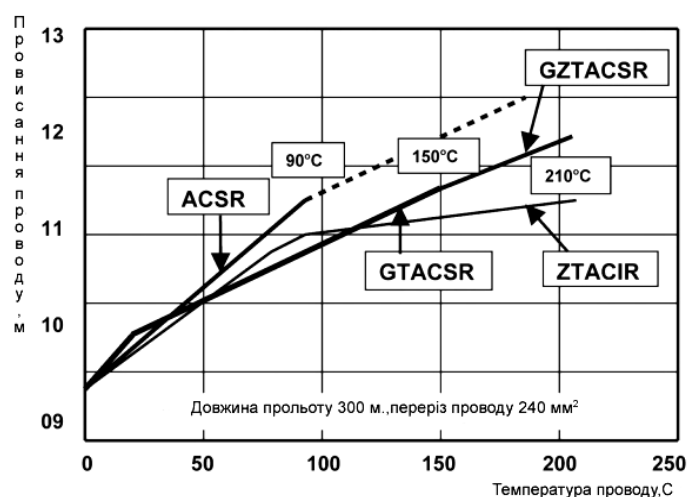


Рис. 2. Характеристики «температура-провисання» різних типів проводів

Економічність прокладання нових типів проводів найбільшою мірою залежить від того, будеться нова лінія чи реконструюється стара. Ефективність заміни звичайного дроту АСРС на дріт з полімерним осердям типу ТАСРС (корпорації Exsum, Японія) ілюструють такі розрахункові дані. При довжині прольоту 300 м і перерізі дроту 160 мм<sup>2</sup> провисання ТАСРС становить 9,4 м за

температури 150°C, у той час як для проводу ACSR він дорівнює 11,3 м за температури 90 °С . Це дозволяє підвищити пропуску здатність ПЛ 66 кВ довжиною 10 км з 454 до 705 А. Повна вартість варіанта реконструкції з заміною на ACSR підвищеного перетину прийнята за 1,00. Незважаючи на істотно дорожчий провід TACFR, витрати під час його використання удвічі менші.

### Висновки

Обмежені можливості прокладання нових ліній висувають на передній план питання підвищення пропускну здатності наявних ліній електропередачі. Часто застосовується підвищення навантаження лінії з урахуванням реальних погодних умов на трасі, або за середньостатистичним даними для цієї зони, або за реальними температурами і провисанням проводів, що порівняно малоєфективно (до 20 %).

Підвищення напруги лінії або перерізу проводу пов'язане зазвичай з реконструкцією ліній загалом, з зміцненням опор і фундаментів, розширенням смуги лінії.

Доступнішим і доволі ефективним методом підвищення навантаження лінії є використання нових типів проводів підвищеної нагрівостійкості, великої механічної стійкості і малого теплового подовження. Такий провід може мати робочу температуру до 200 °С, а також істотно менше провисання в прогоні, що дає змогу підвищити навантаження в 1,5–2 рази без змінювання структури лінії (опор, фундаментів, системи підвіски та ізоляторів).

Великі можливості дає використання проводів з гладкою поверхнею (з трапецеїдальними або Z-подібними дротами) для тих трас ПЛ, де сильні вітрові навантаження, снігопади та ожеледь. Економічність прокладки нових типів проводів залежить від того, чи будується нова лінія або реконструюється стара. Розрахунки та закордонна практика показують, що, незважаючи на істотно дорожчий провід з поліпшеними характеристиками (до 10 разів порівняно зі звичайним), витрати у разі заміни на нього можуть бути значно менші, ніж під час реконструкції із заміною опор і фундаментів.

1. *Pratayon P., Catchpole P., Guerard S. et al. (WG B2/C1.19 CIGRE) Increasing capacities of overhead lines needs and solutions. Потребность и возможности повышения пропускной способности воздушных линий. Доклад СИГРЭ В2-108, 2008 г. – С. 37–41.* 2. *Barthold L.O., Douglass D.E., Woodford D.A. Maximizing the capability of existing AC transmission lines. Достижение максимума передающей способности воздушных линий переменного тока. Доклад СИГРЭ В2-109, 2008. – С. 58–63.* 3. *Jarass L., Obermair G.M. Erhöhung der Übertragungsleistung der Höchstspannungsnetze – Optimierung vor Verstärkung vor Neubau. Повышение передаваемой мощности в сетях СВН–оптимальное усиление линии вместо прокладки новой. Bericht an Energie\BT-Wirtschaftsausschuss, 15.12.2008, Wiesbaden. – С. 67–74.* 4. *WG B2.12 CIGRE. Conductors for the Uprating of Overhead Lines. Провода для повышения нагрузочной способности воздушных линий. Electra, 2004, No 213, 31-39. (Техническая брошюра No 244). – С. 33–35.* 5. *Clairmon B. High-Temperature Low-Sag Conductors. Проводники высокой нагревостойкости и уменьшенного провеса в полете. EPRI Transmission Research Program Colloquium 11.09.2008. – С. 24–30.* 6. *Leenders I.P.A. Реконструкция ВЛ с применением нагревостойких проводов и проводов с малым провесом. Upgrading overhead lines with high temperature, low sag conductors. Vortrag im Technische Universitaet Eindhoven, Nederland. Januar 2007. – С. 43–45.*