

# Повышение пропускной способности ВЛ: анализ технических решений

**Колосов С.В., Рыжов С.В.**

*ЗАО НТЦ «Электросети», 127566 Москва, Высоковольтный проезд, д.1, стр. 36*

---

## Аннотация

Рассмотрены провода повышенной пропускной способности: высокотемпературные провода классической конструкции производства Lumpi-Berndorf, Австрия; высокотемпературные провода с зазором производства J-Power Systems, Япония; компактные провода AERO-Z производства компании Nexans, Бельгия. Приведены специфические особенности каждого типа проводов. Представлено сравнение технических характеристик и экономических показателей проводов повышенной пропускной способности и некоторых проводов АС.

Ключевые слова: высокотемпературные провода; компактные провода

---

## 1. Введение

Известно, что в последние годы многие регионы и города России сталкиваются с проблемой ограниченной пропускной способности ЛЭП. По данным ОАО «ФСК ЕЭС» список регионов пиковых нагрузок включает 16 областей, в числе которых Московская, Ленинградская, Нижегородская, Архангельская, Волгоградская области, Краснодарский и Пермский край, республика Коми, Карелия, Тува, Дагестан и другие. Уже сегодня энергопотребление этих районов в несколько раз превышает величины, заложенные в Энергетической стратегии РФ до 2020 года, и потребление энергии в них постоянно растёт. Значительное увеличение спроса на электроэнергию за последние 10 лет требует постоянного расширения или обновления распределительных сетей энергоснабжающих предприятий.

## 2. Актуальность проблемы

Для удовлетворения быстрорастущих потребностей электросетевые компании вынуждены постоянно модифицировать существующие сети, применяя следующие классические методы:

- строительство дополнительных ВЛ;
- замена проводов на большие поперечные сечения;
- повышение напряжения;
- расщепление фазы.

Указанные методы хотя и применяются в настоящее время, однако имеют ряд существенных недостатков. Так, например, строительство дополнительных ВЛ требует значительных капиталовложений, временных затрат и получения разрешений на строительство. Второе направление оказывается не всегда возможным, поскольку сталеалюминиевый провод большего сечения обладает и повышенной массой, что при заданных стрелах провеса, ветровых и гололёдных воздействиях

создаёт повышенные нагрузки на элементы опор, на которые старые опоры часто не рассчитаны, и возникает необходимость в установке дополнительных опор ЛЭП. Однако установка новых опор может обернуться серьёзными проблемами в густонаселённых районах, районах частных земель, в национальных парках, заповедниках и других зонах с запретом на строительство. Третье и четвертое направления почти всегда приводят к тем же проблемам, что и второе - возникает необходимость перестраивать всю линию.

Отсюда появляется актуальная необходимость повышения передаваемой мощности воздушных линий, по возможности, избегая строительства новых линий, полной перестройки существующих линий, подвески новых цепей и т.д.

### **3. Новые пути повышения пропускной способности воздушных линий и современные тенденции**

В настоящее время существуют решения, не имеющие недостатков вышеописанных методов. Эти решения обеспечивают увеличение пропускной способности имеющихся линий за счёт применения специальных проводов. Такая постановка задачи привлекательна как с технической, так и с экономической точки зрения.

На сегодняшний день, выдвигаются следующие требования к современным проводам:

- максимально высокая электропроводность;
- максимально высокая механическая прочность;
- небольшая погонная масса;
- устойчивость к высоким температурам;
- малые температурные удлинения;
- устойчивость к старению и ветровым воздействиям.

Условия выполнения вышеописанных требований являются конкурирующими, поскольку, например, наилучшая прочность обеспечивается сталью, а наилучшая электропроводность и малая масса алюминием. Для получения необходимой температурной устойчивости рассматривалось применение дисперсионно-твердеющих материалов, циркониевых сплавов, композитных и других материалов, а также получением и внедрением волокон оксида алюминия.

### **4. Мировые фирмы – изготовители современных проводов ВЛ**

На мировом рынке в сфере производства классических и специальных типов проводов выступают несколько десятков компаний. На сегодняшний день актуальные в России поставщики уже определились:

- Nexans, Бельгия;
- Lumpi-Berndorf, Австрия;
- J-Power Systems, Япония.

#### **4.1. Провода AERO-Z, Nexans, Бельгия**

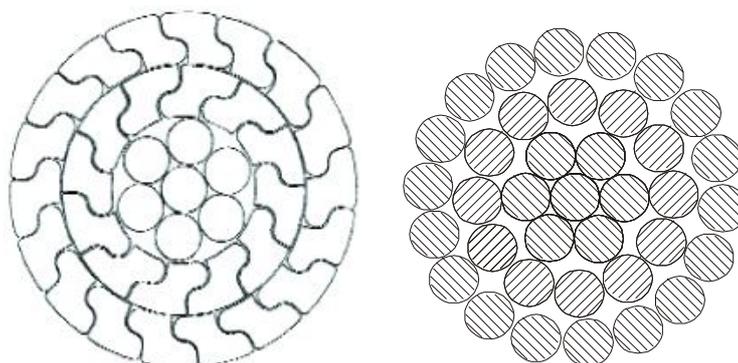
##### **4.1.1. Конструктивные особенности**

Одним из путей решения проблемы повышения пропускной способности является применение так называемых компактных проводов типа AERO-Z. В таблице 1 приведены сравнительные характеристики сталеалюминиевого провода АС 240/56, AERO-Z 346-2Z и AERO-Z 366-2Z.

Таблица 1

Марка	Диаметр, мм	Сечение, мм <sup>2</sup>	Сопротивление, Ом/км	Рарывное усилие, кг	Масса, кг/км	Аэро сопр.
АС 240/56	22,4	241/56,3 (100%)	0,12182	9778	1106	0,95
AERO-Z 346-2Z	22,4	345,65 (143%)	0,0974	11132	958	0,8
AERO-Z 366-2Z	23,1	366,13 (151%)	0,0919	11617	1014	0,8

Основная особенность провода AERO-Z заключается в форме проволок токопроводящих слоев – их сечение напоминает букву «Z» (см. рисунок 1а).



а) AERO-Z

б) провод АС

Рисунок 1. Поперечное сечение проводов

#### 4.1.2. Принципы и эффективность

Верхний повив провода AERO-Z практически идеально гладкий (см. рисунок 1), имеет незначительные винтовые канавки, возникающие между верхними кромками Z-образных проволок. За счёт этого конструкция провода AERO-Z получается более компактной по сравнению с проводом АС и при том же диаметре имеет большее сечение алюминия. За счет того, что вместо стального сердечника используются алюминиевые проволоки, провод имеет меньшую массу (см. табл.1). Такие особенности влекут за собой меньшие механические напряжения в опорах в случаях применения проводов равного диаметра или позволяют увеличить полезное электропроводящее сечение при равных механических напряжениях в опорах (см. табл.1).

Относительно большая контактная поверхность между двумя Z-образными проволоками одного слоя обеспечивает эффективную защиту от просачивания консистентной смазки изнутри провода. В этой связи, внутренняя защита оказывается лучше, чем у традиционных проводов АС, в которых со временем наблюдается вытеснение защитной смазки наружу под действием циклов нагрузки.

При обрыве проволоки внешнего повива провода AERO-Z остаются на месте под действием механических рабочих напряжений. Данное свойство сохраняется до тех пор, пока не происходит обрыв пяти смежных проволок.

Увеличенное самозатухание провода несколько уменьшает проблемы пляски. Вероятность появления пляски значительно ниже, и, если она возникает, её амплитуда будет значительно меньше. Хотя по этому вопросу достоверных экспериментальных данных не опубликовано

Провод AERO-Z имеет повышенную крутильную жесткость, а поэтому лучше противостоит снегу и обледенению. Обледенение происходит одностороннее и по-

этому растёт быстрее, а увеличение массы гололеда с одной стороны приводит к его скорейшему отрыву.

#### **4.1.3. Недостатки**

Стоимость за километр провода AERO-Z примерно в шесть раз выше по сравнению с проводом АС. В проводе AERO-Z не допускается длительного повышения температур свыше 80 °С.

#### **4.2. Провода TACSR/ACS и (Z)TACSR/HICIN компании «Lumpi-Berndorf», Австрия**

Увеличение пропускной способности проводов TACSR/ACS и (Z)TACSR/HICIN обеспечивается их большей рабочей температурой. Эти провода устойчивы к высокой температуре, могут в нормальных условиях продолжительное время нести более высокую токовую нагрузку, чем традиционные сталеалюминиевые провода.

##### **4.2.1. Конструктивные особенности.**

Провода по конструкции напоминают классические провода АС: стальной сердечник и токопроводящие повивы (см. рисунок 2).

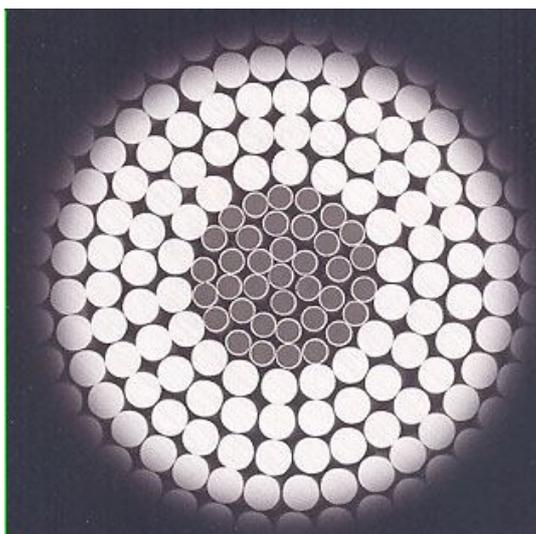


Рисунок 2. Структура провода TACSR/ACS "Lumpi-Berndorf", Австрия

Отличия в конструкции состоят в использованных материалах. Токопроводящие повивы высокотемпературных проводов сделаны из специального термостойкого алюминия TAL, либо сверхтермостойкого сплава ZTAL.

##### **4.2.2. Принципы и эффективность**

Оба сплава TAL и ZTAL состоят из чистого алюминия с добавкой циркония, с той разницей, что сплав ZTAL имеет большее количество циркония.

Таблица 2

Режим	Материал токопроводящего слоя		
	Al	TAL	ZTAL
Рабочая температура, °С	80	150	210
Краткосрочный (до 30 мин) нагрев, °С	? 110 ?	180	240
Температура при КЗ < 1 сек, °С	160	220	280
Разрывное усилие, кгс/мм <sup>2</sup>	16-18	16-18	16-18
Модуль упругости, кгс/мм <sup>2</sup>	6000	6000	6000
Козф. Линейного расширения, 1/°С	2.3x10 <sup>-5</sup>	2.3 x10 <sup>-5</sup>	2.3 x10 <sup>-5</sup>

Добавка циркония повышает температуру рекристаллизации основного компонента – алюминия, и, кроме того, уменьшает размер зерен при рекристаллизации. В результате, токопроводящие проволоки сохраняют все механические и электрические характеристики при достаточно больших нагревах (см. таблицу 2).

В проводах Lumpi-Berndorf в качестве материала для сердечника применяется сталь с покрытием из алюминия. Для повышения прочностных свойств и уменьшения стрел провеса в проводах (Z)TACSR/HICIN вместо простой стали применяется специальный сплав «Инвар». Проволки из сплава также защищаются нанесением на его поверхность алюминиевого покрытия (см. Таблицу 3).

Таблица 3

Характеристика	Материал сердечника		
	Оцинкованная сталь	Сталь плакированная алюминием	Инвар
Модуль упругости, кгс/мм <sup>2</sup>	20700	16200	15500
Козф. линейного расширения, 1/°С	11*E-6	13*E-6	3,7*E-6(<230°С) 10,8E-6(>230°С)
Напряжение при 1% деформации	1100-1170	1100-1200	990-1070
Разрывное усилие, кгс/мм <sup>2</sup>	1300-1400	1070-1340	1125-1225
Удлинение, %	3-4	-	1.5
Плотность, г/см <sup>3</sup>	7.78	6.59	7.1

Использование термоустойчивого алюминия, как токонесущей части провода, дает возможность значительно увеличить пропускную способность, а применение супертермоустойчивого сплава еще усиливает этот эффект. В таблице 4 приведено сравнение технических характеристик различных проводов.

Таблица 4

Характеристика	Провод		
	AC 240/39	TACSR/HACIN	ZTACSR/HACIN
Масса, кг	959	939	939
Разрывное усилие, кН	80,9	87,26	87,26
Токонесущая способность, А	610	861	1180
Возрастание тока, %	100	141	193
Возрастание стоимости, %	100	450	550

Линии, работающие в штатном режиме при температуре проводов 150°С или 210°С, не подвержены отложению гололеда, что означает как резкое снижение вероятности возникновения пляски, так и уменьшение гололедных и ветровых нагрузок на опоры.

Даже при увеличении пропускной способности в полтора раза по отношению к проводу АС, высокотемпературные провода имеют меньший диаметр, что также позволяет либо снизить нагрузку на опоры, либо увеличить пролеты линии.

Провода TACSR/ACS и (Z)TACSR/HACIN по конструкции не отличаются от классических проводов. Это позволяет использовать все известные типы арматуры: спиральную арматуру, клиновые зажимы и прессуемые зажимы. Конечно, арматура должна быть рассчитана для работы с высокотемпературными проводами.

Методики работы и монтажа проводов Lumpi-Berndorf идентичны методикам для классического провода АС. Не требуется новых технологий, устройств и обучения персонала.

Еще одним преимуществом провода TACSR/ACS Lumpi-Berndorf является его невысокая стоимость - 270% от стоимости АС за километр.

Провода Lumpi-Berndorf аттестованы межведомственной комиссией ОАО «ФСК ЕЭС».

#### **4.2.3. Недостатки**

Недостатком проводов TACSR/HICIN и (Z)TACSR/HICIN Lumpi-Berndorf является их высокая стоимость до 450% за километр.

### **4.3. Провода GTACSR компании «J-Power», Япония**

Увеличение пропускной способности провода GTACSR обеспечивается, также как и провода «Lumpi Berndorf», большей рабочей температурой. Эти провода устойчивы к высокой температуре, могут в условиях продолжительного времени нести высокую токовую нагрузку.

#### **4.3.1. Конструктивные особенности**

Особенность провода GTACSR заключается в том, что между токопроводящими слоями провода и стальным сердечником имеется зазор (см. рисунок 3), отсюда и название – «провод с зазором».

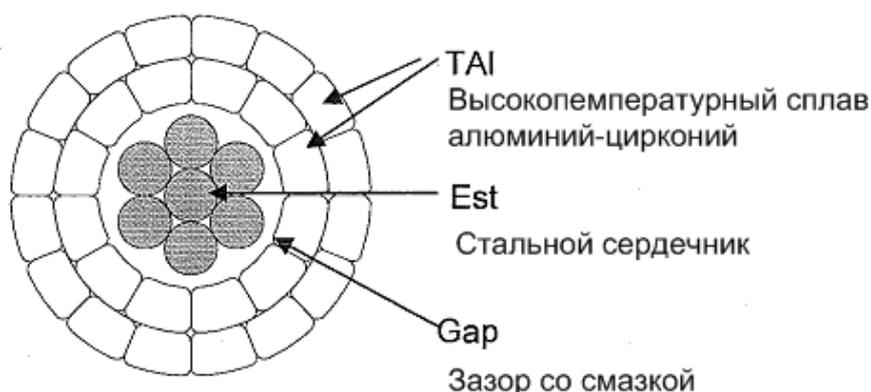


Рисунок 3. Структура провода GTACSR компании «J-Power», Япония

#### **4.3.2. Принципы и эффективность**

Преимущества конструкции провода с зазором состоят в том, что при монтаже и нагреве после него, все тяжение приходится на стальной сердечник, и, соответственно, коэффициент расширения и модуль упругости, провода как целого, совпадают с характеристиками стали. Поэтому провод значительно меньше под-

вержен удлинению за счет возрастания температуры. При рабочих температурах стрела провеса провода ощутимо меньше, чем для проводов АС (см. Таблицу 5 и рисунок 4а).

Таблица 5

Расчетные режимы	Марка провода			
	AC-300		GTACSR 287/53SQ	
	Тяжение, кг	Стрела, м	Тяжение, кг	Стрела, м
Среднегодовая температура $t = 11,1^{\circ}\text{C}$	2514 (24,7%)	11,0	2459 (19,2%)	11,07
Ветер 162,5 Па, гололед 10 мм., $t = -5^{\circ}\text{C}$	4280 (42%)	11,9	4244 (33,1%)	11,81
Режим грозозащиты, $t = +15^{\circ}\text{C}$	2460 (24,1%)	11,3	2423 (18,9%)	11,24
Температура провода $t = -30^{\circ}\text{C}$	3067 (31%)	9,0	2939 (23%)	9,26
Температура провода $t = 80^{\circ}\text{C}$	1949 (19,1%)	14,3	2154 (16,8%)	12,64
Температура провода $t = 150^{\circ}\text{C}$			1927 (15,1%)	14,13

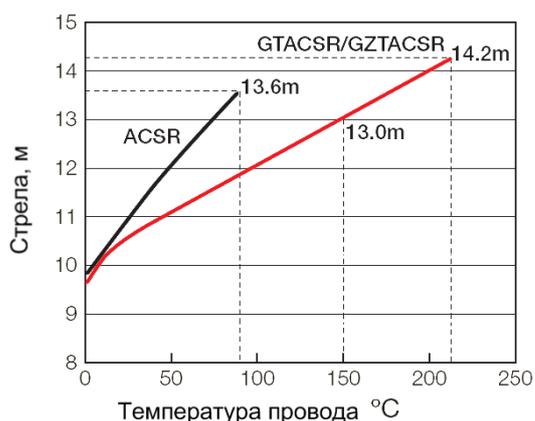


Рисунок 4а. Зависимость стрелы провеса от температуры для провода с зазором и провода АС

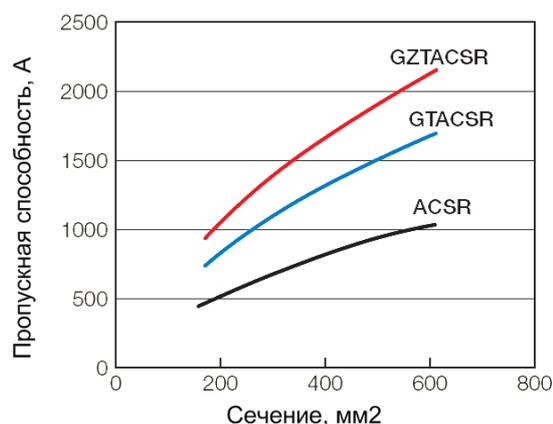


Рисунок 4б. Зависимость Пропускной способности от сечения для проводов с зазором и провода АС

Механические характеристики, совместно с высокой пропускной способностью (см. рисунок 4б), делают этот провод серьезным претендентом для решения проблемы пропускной способности линий.

Провода J-Power аттестованы межведомственной комиссией ОАО «ФСК ЕЭС».

### 4.3.3. Недостатки

- сложная конструкция провода;
- сложная технология монтажа провода;
- необходимость специального оборудования;
- обучение персонала;
- сложный ремонт провода;
- высокая стоимость провода за километр: ~400 % в сравнении с проводом АС.

## 5. Сравнение проводов

Следует обратить внимание на то, что сравнение проводов, как таковое, является сложной задачей по той простой причине, что существенных параметров у этих проводов несколько. Если одно сравнение показывает неоспоримое преимущество одного провода, то сравнение других характеристик может показать результат вплоть до диаметрально противоположного. Необходимо выбрать наиболее критические параметры и по ним оценивать целесообразность применения того или иного типа провода в конкретной ситуации.

В таблице 6 приведено технико-экономическое сравнение семи разных проводов для проекта ВЛ 220 кВ Афипиская-Крымская. Самые жесткие требования предъявлялись по стреле провеса, массе, максимальной токовой пропускной способности (МТПС) и стоимости. Сравнение выполнено для пролета длиной 360 м при условии достижения максимально допустимого по ПУЭ-7 тяжения провода – 45% от разрывного усилия, но не превышая уровень 42,5 кН.

Таблица 6

	Компания производитель	Провод	Диаметр, мм	Масса, кг/км	МТПС, А	Стоимость, евро/км*	Стрела при T=max, м
1		АС 240/39	21,6	952	480	1735 (76%)	10,1
2		АС 300/56	24,2	1257	600	2291 (100%)	11,05
3		АС 400/22	26,6	1261	830	2300 (100%)	12,3
4	Lumpi-Berndorf	TACSR/HACIN 212/49	21	939	861	10500 (450%)	10,5
5	Lumpi-Berndorf	TACSR/ACS 212/49	21	914	871	6200 (270%)	11,6
6	J-Power Systems	GTACSR 217/49	20,3	1015	840	10500 (450%)	9,1
7	Nexans	366-2Z	23,1	1014	732	13700 (600%)	9,9

\* Сравнение цен актуально на момент написания статьи – 21.01.2009.

В данном случае, провода Lumpi-Berndorf типа TACSR/HACIN имеют неоспоримое преимущество по стреле провеса, а TACSR/ACS дают существенное увеличение токовой пропускной способности при низком весе и невысокой цене.

## 6. Выводы

Пропускная способность ВЛ за счет применения компактных или высокотемпературных проводов может возрастать от нескольких десятков до нескольких сот процентов по отношению к проводам АС (ACSR). Опыт применения проводов повышенной пропускной способности в Европе, Японии и Америке уже насчитывает более двух десятков лет. В 2008 году некоторые производители проводов повышенной пропускной способности вышли на российский рынок. В настоящее время представлен широкий спектр проводов нового поколения, что позволяет более эффективно решать задачи оптимизации конструкции линий. Однако, в связи с тем, что конструкция и работа проводов отличаются от классических, потребуется изменение расчетных программ для проектирования линий, а также изменение подхода к оптимизации.