

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ФАКТОРА НА ПРОПУСКНУЮ СПОСОБНОСТЬ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ 110 КВ НА ЮГЕ РОССИИ

**АВТОРЫ:**

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

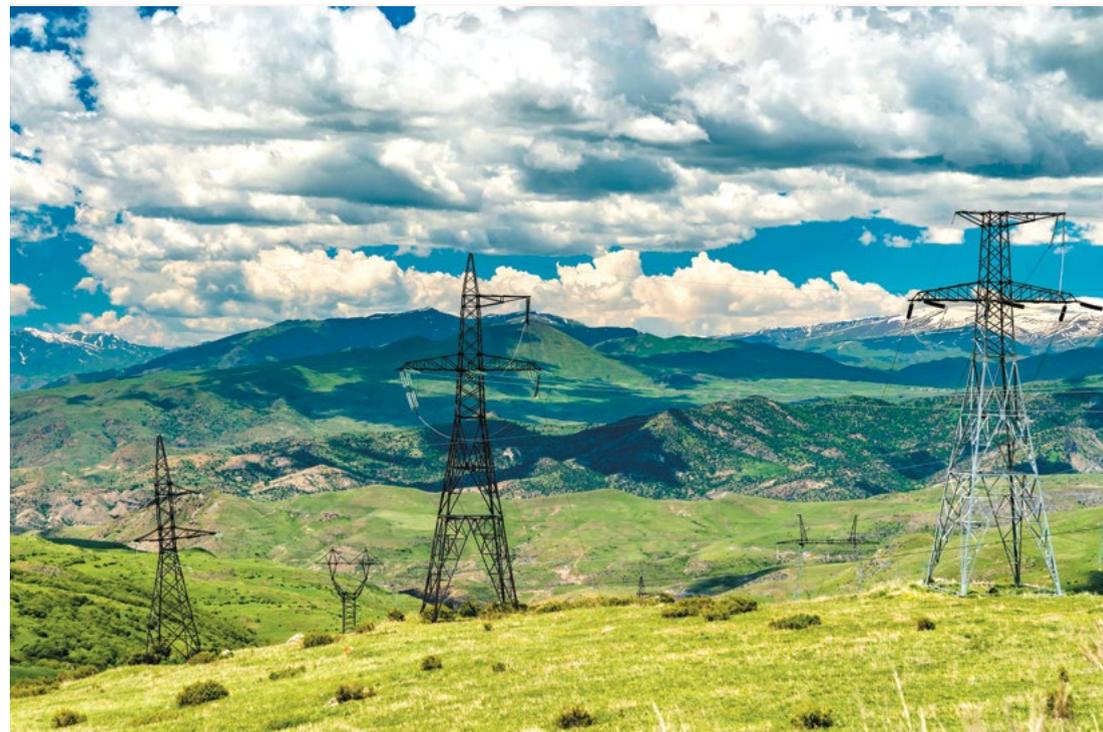
В.Н. КУРЬЯНОВ,  
О.В. МИХАЙЛОВА,  
ФИЛИАЛ ФГБОУНИИ  
«МЭИ» В Г. ВОЛЖСКОМ

В.А. ФОКИН,  
ООО «ЭНЕРГОСЕРВИС»,  
МОСКВА

**По**казатели ОЭС Юга стали первым примером в истории ЕЭС России, когда исторический максимум в объединенной энергосистеме

был превышен в период летних максимумов нагрузки. Ранее исторические максимумы потребления во всех семи ОЭС фиксировали только зимой.

**Ключевые слова:** пропускная способность; максимум потребления; высокотемпературные проводники; воздушные линии; энергопотребление; реконструкция.



Воздушные линии электропередачи в горах Кавказа

## ВВЕДЕНИЕ

При актуализации и проектировании схем электроснабжения обосновано применение комплексного подхода к оптимизации существующих схем и строительству новых высоковольтных воздушных линий (ВЛ) электропередачи. Вследствие постоянного увеличения энергопотребления во многих городах и регионах страны возникает проблема недостаточной пропускной способности линий электропередачи. Чтобы решить проблему, связанную с увеличением спроса, необходимо провести модернизацию или реконструкцию распределительных сетей [2-6]. Задачами формирования схемы развития является обеспечение надежного функционирования в долгосрочной перспективе, баланса между производством и потреблением электроэнергии, скоординированное планирование строительства и ввода в эксплуатацию (вывода из эксплуатации) объектов сетевой инфраструктуры. При этом конфигурация графика нагрузки имеет большое значение не только для баланса, режима электростанций, но и для нормальной работы существующих и вновь проектируемых ВЛ.

## ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ МАКСИМУМА НАГРУЗКИ НА ПРОПУСКНУЮ СПОСОБНОСТЬ ПРОВОДНИКОВ

Последствия увеличения энергопотребления для южных регионов Российской Федерации могут усугубляться высокими значениями температур окружающей среды в летний период. По оперативными данными филиала Системного оператора — Объединен-

ного диспетчерского управления (ОДУ) Юга, в операционную зону которого входит Объединенная энергетическая система (ОЭС) Юга, 19 июля 2021 г. в ОЭС Юга установлены новые исторические максимумы потребления электрической мощности — 17145 МВт (на 577 МВт выше аналогичного показателя, зафиксированного 21 января 2021 г.). ОЭС Юга располагается на территории Южного и Северо-Кавказского федеральных округов и 15 субъектов Российской Федерации: Адыгеи, Дагестана, Ингушетии, Кабардино-Балкарии, Калмыкии, Карачаево-Черкесии, Крыма, Северной Осетии-Алании, Чечни, Краснодарского и Ставропольского краев, Астраханской, Ростовской, Волгоградской областей и города Севастополя.

В энергосистеме Кубани новый исторический максимум 19 июля 2021 г. составил 5420 МВт, или плюс 283 МВт к историческому максимуму 16 июля 2021 г. и плюс 383 МВт к многолетнему рекорду 9 августа 2017 г. Показатели ОЭС Юга стали первым примером в истории ЕЭС России, когда исторический максимум в объединенной энергосистеме был превышен в период летних максимумов нагрузки. Ранее исторические максимумы потребления во всех семи ОЭС фиксировали только зимой. Установление рекордов потребления связано с периодом экстремально высоких температур в данном регионе.

Температура токопроводящих жил определяется погодными условиями (солнце, ветер, температура воздуха) и величиной тока нагрузки, а пропускная способность ВЛ электропередачи зависит от температуры токопроводящих жил [1].

Пропускная способность проводника определяется на основе теплового расчета. В общем случае тепловой расчет проводника типа АС сводится к определению температуры токопроводящей жилы с учетом потерь в жи-

### ИЗ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПРЕДЕЛЬНЫХ ТОКОВЫХ НАГРУЗОК ПО УСЛОВИЯМ СОХРАНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ПРОВОДОВ И ДОПУСТИМЫХ ГАБАРИТОВ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ, СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ ОАО «ФСК ЕЭС»

Длительно допустимая температура провода по условиям механической прочности провода — температура, составляющая 70 °С, согласно ПУЭ-6, п. 1.3.22.

Длительно допустимая температура для проводов марок, не предусмотренных ГОСТ 839, определяется по данным завода изготовителя.

Аварийно допустимая температура провода — температура, равная меньшему из двух значений:

- по условию механической прочности провода (определяется согласно ГОСТ 839):
  - для алюминиевых и сталеалюминевых проводов — 90 °С;
  - для медных проводов — 80 °С;
- для проводов марок, не предусмотренных ГОСТ 839, определяется по данным заводов изготовителей.

При определении соответствия габаритных расстояний нормативным требованиям ПУЭ-7 следует руководствоваться следующими положениями:

- 1) Наименьшее расстояние от проводов ВЛ до поверхности земли должно оцениваться при наибольшей допустимой токовой нагрузке для ВЛ 750 кВ и выше в ненаселенной, труднодоступной местности и недоступных склонах.
- 2) Наименьшее расстояние от проводов ВЛ до поверхности земли, производственных зданий и сооружений должно оцениваться при наибольшей допустимой токовой нагрузке для ВЛ 330 кВ и выше в населенной местности.

лах. При этом учитываются тепловые сопротивления провода и окружающей среды, а также колебания условий окружающей среды из-за сезонных изменений температуры и посторонних источников тепла. При прохождении длительно допустимого тока  $I_{доп}$  (А) по проводу с сопротивлением  $R$  (Ом) будет выделяться тепло (Вт):

$$Q = I_{доп}^2 \cdot R. \quad (1)$$

Количество тепла, которое будет отдано поверхностью голого провода в окружающую среду за единицу времени, можно с достаточной

для практики точно определить по формуле

$$Q = CF(\theta_{доп} - \theta_{ср}), \quad (2)$$

где  $C$  — коэффициент теплоотдачи поверхности голого провода, Вт/см<sup>2</sup>·°С;

$F$  — площадь поверхности провода, см<sup>2</sup>;

$\theta_{доп}$  — длительно допустимая температура провода, °С;

$\theta_{ср}$  — принятая температура окружающей среды, °С.

## СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЗЛИЧНЫХ ПРОВОДНИКОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ЮЖНЫХ РЕГИОНОВ РФ

Как показано на рис. 1, величина длительно допустимого тока проводника, а соответственно и его

### ХАРАКТЕРИСТИКИ РАССМАТРИВАЕМЫХ ПРОВОДНИКОВ

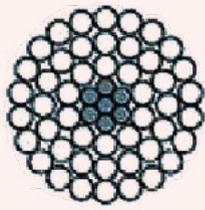
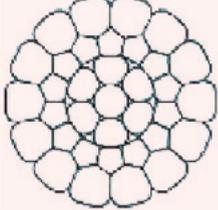
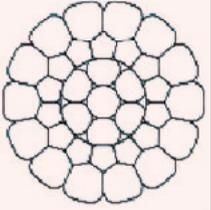
Марка провода	АС, провод алюминиевый со стальным сердечником	АСВП, провод сталеалюминевый высокопрочный пластически обжатый	АСВТ, провод сталеалюминевый высокотемпературный пластически обжатый
Внешний вид			
Материал проволок сердечника	Сталь	Сталь	Сталь
Материал проволок наружных повивов	Термообработанный алюминиевый сплав	Термообработанный алюминиевый сплав	Термообработанный алюминиевый сплав
Длительно допустимая рабочая температура, °С	90	90	150
Особенности	Провода состоят из стального сердечника и алюминиевых проволок, скрученных правильной скруткой с направлением скрутки соседних повивов в противоположные стороны, причем наружный повив имеет правое направление скрутки	Повышенная механическая прочность и компактность конструкции, обеспечиваемые пластической деформацией стального сердечника и проволок повивов перед свивкой, позволяют использовать провода значительно меньших диаметров и массы в одинаковых по длине пролетах ВЛ или увеличивать расстояния между опорами (при одинаковых сечениях проводов) до 40% без изменения пропускной способности ВЛ, а также повышать предельно допустимое значение тока при одинаковых максимально допустимых температурах	Сплав, увеличивающий предельно допустимую температуру проводов с 90 °С до 150 °С, и конструкция провода позволяют без изменения сопротивления провода (относительно АСВП), достичь роста пропускной способности (до 100%) без значительного удорожания

Таблица 1

пропускная способность снижаются с ростом температуры окружающей среды. Исходя из этого становится очевидной необходимость пересмотра применяемых материалов ВЛ южных регионов. Согласно изученным данным, на ВЛ 110 кВ южного региона в настоящее время применяют устаревающие проводники типа АС.

Увеличение температуры воздуха, а также воздействие солнечной радиации грозят в данных условиях отключениями массы потребителей.

В табл. 1 приведена сравнительная характеристика существующих и предлагаемых проводников.

Из рис. 1 видно, что значения длительно допустимого тока сравниваемых проводников ВЛ, определяемые с учетом солнечной радиации, сильно различаются при одинаковых температурных условиях окружающей среды.

Характеристика проводника АСВТ отображает сравнительно более высокие показатели длительно допустимого тока относительно характеристики АС 120/19, а также АСВП-128–36. Данные показатели обусловлены применением циркониевых сплавов, новой технологии уплотнения, а также инновационной конструкции сердечника и провода в целом.

### СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОТЕРЬ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Произведем расчет потерь активной мощности в линиях с применением проводников типа АС, АСВП, АСВТ. При расчете потерь учтем температуру окружающей среды и нагрев проводов токами нагрузки [7, 8]:

### ЗАВИСИМОСТЬ ДЛИТЕЛЬНО ДОПУСТИМОГО ТОКА ПРОВОДНИКОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

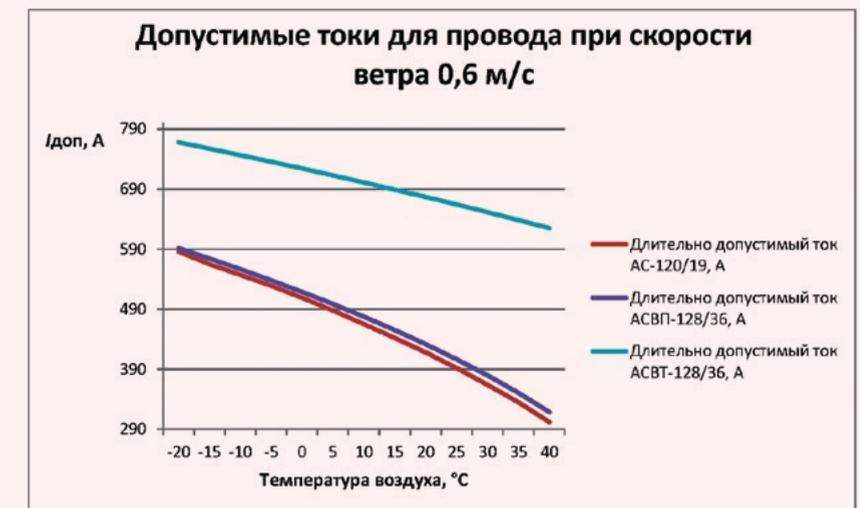


Рис. 1

### СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ ПРОВОДОВ



Рис. 2

$$\Delta P = \frac{3R_0(1+\alpha\theta_{окр})I^2}{1-\frac{3R_0\alpha I^2}{A}} \quad (3)$$

Числитель в этом выражении представляет собой потери, приведенные к температуре окружающей среды, а знаменатель учитывает увеличение потерь вследствие нагрева проводов током нагрузки.

Коэффициент А определяется по следующему уравнению при максимальном допустимом токе  $I_{доп}$ :

$$A = \frac{3I_{доп}^2 R_0 (1 + \alpha \theta_{доп})}{\theta_{доп} - \theta_{окр}} \quad (4)$$

где  $\theta_{доп}$  — максимально допустимая температура провода, °С;

$\theta_{окр}$  — температура окружающей среды, °С, к которой приведен допустимый ток.

В табл. 2 приведены исходные данные для расчета потерь мощности на ВЛ.

Выбор высокой температуры воздуха обусловлен соответствием реальным рабочим условиям температур проводов.

Данные табл. 2 получены при справочном значении допустимого тока с учетом поправок на температуру окружающей среды.

В табл. 3 и на рис. 2 представлены результаты сравнительного анализа потерь мощности проводов ВЛ электропередачи.

Выполненные расчеты справедливы для стационарного теплового режима. Таким образом, у проводников типа АСВП и АСВТ характеристики намного лучше относительно рассматриваемого проводника АС при условиях одинаковой температуры окружающей среды, а также равной токовой нагрузке.

## ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ НА ВЛ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Наименование и обозначение параметра	Численное значение		
	АС-120/19	АСВП-128/36	АСВТ-128/36
Справочное погонное активное сопротивление при 20 °С, $r_{20}$ , Ом/км	0,249	0,225	0,2282
Погонное активное сопротивление при 0 °С, $r_0$ , Ом/км	0,22908	0,207	0,20994
Температурный коэффициент сопротивления, $\alpha$ , °С <sup>-1</sup>	0,0043		
Диаметр провода, $d_{пр}$ , м	0,0152	0,0152	0,0152
Допустимая температура, $\theta_{доп}$ , °С	90	90	150
Температура окружающей среды, $\theta_{окр}$ , °С	40	40	40
Максимально допустимый ток, $I_{доп}$ , А	302	318,62	624,95

Таблица 2

## СНИЖЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ВЫТЯЖКИ

Пластическая деформация не только значительно повышает механическую прочность, но и в несколько раз снижает вытяжку (удлинение) в процессе эксплуатации вне зависимости от применяемого металла. Соответствующие испытания проводились в АО «ВНИИЖТ» и «НТЦ Россети ФСК ЕЭС» с изделиями из разных металлов — от стали до меди.

Кроме того, снижается и зависимость характеристик провода от температуры. Так, коэффициент температурного удлинения на 7% больше у АС 120/19, чем у АСВП (Т)128/36.

Для многих существующих ВЛ повышение пропускной способности уменьшается из-за недостаточных расстояний по вертикали до земли и пересекаемых объектов вследствие температурного или эксплуатационного изменения стрел провеса.

Подобные изменения габаритов ВЛ ограничивают токовые нагрузки. Например, в условиях безветрия безопасные габариты обеспечены при токовой нагрузке до 200–220 А. При действии ветра скоростью до 10 м/с, направленного поперек проводов, токовые нагрузки могут повышаться до 400–550 А в зависимости от температуры окружающей среды и интенсивности солнечной радиации.

Дополнительное существенное повышение пропускной способности ВЛ можно получить за счет бес-

## РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНЕНИЯ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ ПРОВОДОВ

Нагрузочный ток, I, о. е.	Марка	Максимально допустимый ток, I <sub>доп</sub> , А	Коэффициент А	Потери активной мощности в линии с учетом нагрева, ΔP, кВт/км
0,4	АС-120/19	302	1739	12,05
0,6				28,01
0,8				52,19
1				86,94
Нагрузочный ток для остальных проводников определен в долях от допустимого тока провода марки АС-120/19 I, А				
120,8	АСВП-128/36	318,62	1749	10,86
181,2				25,16
241,6				46,64
302	АСВТ-128/36	624,95	3679	77,12
120,8				10,85
181,2				24,84
241,6				45,02
302				72,17

Таблица 3

печения стабильности тяжения проводов и габаритов проводов до земли и пересекаемых объектов. Это особенно важно для ВЛ, проходящих по территориям со сложным рельефом, холмистым и горным участкам, для пролетов, где характер местности резко меняется, а провода оказываются закрытыми от действия ветра различными препятствиями естественного или искусственного происхождения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Повышение пропускной способности существующих ВЛ требует дополнительных затрат. Однако использование предложенных проводников при новом строительстве или реконструкции ВЛ с применением проводов повышенной пропускной способности позволит обеспечить резерв токовой на-

грузки. Увеличение пропускной способности проводов обусловливается их большей по сравнению с обычными сталеалюминевыми проводами рабочей температурой. За счет повышенной устойчивости к температурам свыше 100 °С данные провода могут нести более высокую токовую нагрузку в нормальных условиях.

## ЛИТЕРАТУРА

- Wang J., Xiaobo C. Temperature safety analysis and backup protection scheme improvement for overhead transmission line in power oscillation condition. Electric Power Systems Research. January, 2019. P. 88–98.
- Курьянов В.Н. Анализ разрывного усилия проводов АСВП и АСВТ//Энергосбережение и водоподготовка. 2018. № 6 (116). С. 33–38.
- Курьянов В.Н., Султанов М.М., Фокин В.А., Тимашова Л.В. Инновационные высокоэффективные провода для линий электропере-

дачи//Энергия единой сети. 2016. № 4 (27). С. 70–78.

- Курьянов В.Н., Фокин В.А., Куц Л.Р., Мерзляков А.С. Оптимальные решения для высоковольтных сетей, проблемы развития//Электроэнергия. Передача и распределение. Спецвыпуск CIGRE. 2018. С. 34–37.
- Курьянов В.Н., Швец Е.С., Тимашова Л.В., Фокин В.А. Применение отечественных высокотемпературных проводов АСВТ для ВЛ 110 кВ и их эффективность//Энергия единой сети. 2017. № 5 (34). С. 12–18.
- Курьянов В.Н., Фокин В.А. и др. Эффективность инновационных высокотемпературных проводов АСВТ//Электроэнергия. Передача и распределение. 2019. С. 70–76.
- Шведов Г.В., Азаров А.Н. Оценка влияния метеоусловий на годовые нагрузочные потери электроэнергии в проводах воздушных линий//Электричество. 2016. № 2. С. 11–18.
- Гиршин С.С., Троценко В.М., Горюнов В.Н., Кропотин О.В., Шепелев А.О., Ткаченко В.А. Упрощенная формула для нагрузочных потерь активной мощности в линиях электропередачи с учетом температуры//Омский научный вестник. 2018. № 6 (162). С. 41–49.