

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВЕТРОВЫХ НАГРУЗОК НА СТАЛЕАЛЮМИНИЕВЫЕ ПРОВОДА РАЗЛИЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ

На правах рекламы

АВТОРЫ:

Л.М. ГУРЕВИЧ,
ВОЛГОГРАДСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

В.Ф. ДАНИНКО,
ВОЛГОГРАДСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

В.А. ФОКИН,
ООО «МЕТСБЫТСЕРВИС»

В.И. ФРОЛОВ,
ООО «МЕТСБЫТСЕРВИС»

В работе приведены результаты моделирования методом конечных элементов ветрового напора на сталеалюминиевые провода воздушных высоковольтных линий электропередачи различной

конструкции. Полученные эпюры скоростей воздушного потока и давлений позволяют получить исходные данные, облегчающие проектировщикам выбор профиля сечения проводов для различных ветровых зон.

Ключевые слова: воздушные линии электропередачи; ветровые нагрузки; моделирование; метод конечных элементов.



ВВЕДЕНИЕ

Строительство новых и модернизация старых воздушных линий (ВЛ) электропередачи требует внедрения новых современных типов проводов, которые должны соответствовать ряду основных требований: высокие электропроводность и механическая прочность при небольшой погонной массе; малые пластическое удлинение и стрелы провеса; стойкость к ветровым и гололедным воздействиям; способность работать при высоких температурах; способность к самодемпфированию; технологичность изготовления, монтажа и ремонта. В Положении ПАО «Россети» «О единой технической политике в электросетевом комплексе» [1] рекомендуется на ВЛ 220 кВ и выше применять, кроме традиционных сталеалюминиевых проводов по ГОСТ 839, высокопрочные провода новых конструкций со стальным сердечником, характеризующиеся меньшими коэффициентами аэродинамического сопротивления, повышенной коррозионной стойкостью и стойкостью к гололедно-ветровым воздействиям, большей крутильной жесткостью и позволяющие существенно увеличить пропускную способность без увеличения нагрузки на опоры или превосходящие стандартные провода по техническим характеристикам.

Под действием погодных условий провода линий электропередачи подвергаются различного рода механическим нагрузкам, зависящим от географического положения и топографии местности, в которой проложены ВЛ. Сила ветра, действующая на провода, обычно рассматривается как динамическая нагрузка. Задачи, связанные с поведением проводов ВЛ под действием силы ветра, в основном сводятся к определению способов снижения колебания проводов [2];

КОНСТРУКЦИЯ ПРОВОДА АСВП И АСВТ 216/33

провод	стальной сердечник	Диаметр, мм					
		проволоки					
		стального сердечника			алюминиевой части провода		
центр	1-й слой	2-й слой	3-й слой	4-й слой	5-й слой		
ø18,50	ø6,70	1×ø0,70	1×ø0,95	5×ø1,10 + 5×ø0,85	10×ø1,65	8×ø3,90	8×ø3,53 + 8×ø2,60

Таблица 1

СРАВНЕНИЕ СВОЙСТВ ПРОВОДОВ АС 230/34 И АСВП 216/33

Свойства	АС 230/34	АСВП 216/33
Сечение алюминий/сталь, мм ²	240/34	216,3/32,9
Масса 1000 метров провода, кг	921	870
Электрическое сопротивление 1 км провода постоянному току при 20 °С, Ом, не более	0,1182	0,133
Разрывное усилие провода, Н, не менее	75 050	88 500
Наружный диаметр, мм	21,6	18,5

Таблица 2

так, в работе [3] рассмотрен способ производства проводов такой формы, при которой ветровые колебания значительно снижаются.

Вопрос количественной оценки влияния формы поперечного сечения проводов на поведение под действием ветровой нагрузки достаточно рассмотрен в отечественной и зарубежной литературе. При расчете обычно учитывают площадь проекции провода на плоскость, перпендикулярную направлению воздушного потока, не учитывая возможные турбулентные потоки на неровностях профиля.

Целью данной работы являлось моделирование распределения скоростей ветрового потока вокруг проводов различной формы и определение на этой основе величины ветрового напора в зависимости от возможной скорости ветра.

Традиционно для ВЛ используются неизолированные сталеалюминиевые провода типа АС (ГОСТ 839), состоящие из стального сердечника и нескольких повивов цилиндрической алюминиевой проволоки с направлением скрутки соседних повивов в противоположные стороны. В последние десятилетия в России и за рубежом организован выпуск ряда новых конструкций сталеалюминиевых проводов, обеспечивающих более плотную укладку за счет использования профилированных (сегментных, омега- и Z-образных) алюминиевых проволок, однако использование нецилиндрических проволок значительно повышает стоимость готовой продукции. Проблему повышения плотности укладки алюминиевых и стальных проволок в сталеалюминиевых неизолированных проводах типа АСВП одинарной свивки с линейным касанием проволок (СТО 71915393–ТУ 120–2012)

На правах рекламы

команда ООО «Метсбытсервис» решила пластическим обжатием, которое позволяет при той же пропускной способности провода получить меньший наружный диаметр и максимальное приближение наружного контура к цилиндрическому. Принципиально новая технология обеспечивает затраты на изготовление провода практически в том же объеме, как на стандартных проводах АС, при значительно более высоких характеристиках.

Дополнительное снижение габаритов провода удалось достичь при использовании пластического деформирования не только уже свитого провода, но и предварительного обжатия (со степенью обжатия площади поперечного сечения стального сердечника 11,5–13,5 %) стального сердечника, все повивы которого выполнены с одинаковым шагом свивки в одном направлении с линейным касанием проволок. Характеристики примера, разработанного

ООО «Метсбытсервис» и выпускаемого филиалом «Волгоградский» АО «Северсталь Канаты» такого высокопрочного (АСВП 216/33) или высокотемпературного (АСВТ 216/33) провода, приведены в табл. 1 и 2. Использование новой конструкции пластически обжатого высокопрочного металлического сердечника из проволоки, оцинкованной по группе ОЖ, с временным сопротивлением не менее 1960 Н/мм², позволяет увеличить прочность сердечника на 35–45 % и снизить номинальный диаметр провода при сопоставимых площадях сечения токопроводящей части провода по сравнению со сталеалюминиевым проводом по ГОСТ 839-80, и в результате снизить нагрузку на опоры от веса провода и ветровой вибрации.

Для моделирования поведения потока воздуха вблизи провода был использован пакет программ COMSOL Multiphysics, позволяющий решать дифференциальные

уравнения в частных производных. Основу модели представляло уравнение Навье-Стокса:

$$\rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot \left[-Pl + (\mu + \mu_T)(\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3}(\mu + \mu_T)(\nabla \cdot u)I - \frac{2}{3}\rho kl \right] + F;$$

$$\nabla \cdot (\rho u) = 0; \quad (1)$$

$$\rho(u \cdot \nabla)k = \nabla \cdot [(\mu + \mu_T \sigma_k^*) (\nabla k)] + P_k - \rho \beta_0^* k \omega;$$

$$\rho(u \cdot \nabla)\omega = \nabla \cdot [(\mu + \mu_T \sigma_\omega^*) (\nabla \omega)] + a \frac{\omega}{k} P_k - \rho \beta_0 \omega^2;$$

$$\mu_T = \rho \frac{k}{\omega};$$

$$P_k = \mu_T \left[\nabla u : (\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3}(\nabla \cdot u)^2 \right] - \frac{2}{3}\rho k \nabla \cdot u;$$

где u — скорость воздуха; ∇ — оператор Набла; ρ — плотность воздуха; μ — динамическая вязкость; k — кинетическая энергия турбулентного потока; ω — удельная скорость рассеивания; a , σ_ω^* , σ_k^* , β_0 , β_0^* — коэффициенты для турбулентного потока; l — интенсивность турбулентного потока.

Для осуществления оценки влияния ветра на провода с различной формой поперечных сечений использовалась двумерная модель, геометрия которой изображена на рис. 1.

Были выбраны следующие граничные условия:

- на грани АВ значение скорости ветра, направленного на провод, перпендикулярно АВ:

$$v_{AB} = v_0; \quad (2)$$

- на гранях ВС, CD и AD давление равно нулю:

$$p = 0; \quad (3)$$

границы сечения провода являются недеформируемыми стенками.

Моделирование проводилось при различных значениях скорости v_{AB} , характерных для I, III, IV и особой ветровых зон по ПУЭ-7 [4].

Ветровая нагрузка, действующая на провод перпендикулярно его оси, рассчитывалась как сумма проекций давления на провод на ось x :

$$F = \int n \cdot P dl, \quad (4)$$

где P — давление, n — единичный вектор вдоль оси x .

Проводилось сравнение взаимодействия ветра различной скорости с проводами с различным контуром поперечного сечения, но близкого диаметра: АСВП 128/37 и АС 120/19; АСВП 216/33 и АС 230/34; АСВП 277/79 и АС 240/56 (в числителе и знаменателе — соответственно, площади сечения алюминия и стали в мм²). Рассчитанная ветровая нагрузка отличается от нормативной ветровой нагрузки на провода и тросы P_w^* , определяемой по ПУЭ-7, так как не учитываются изменение ветрового давления по высоте в зависимости от типа местности; влияние длины пролета на ветровую нагрузку; неравномерность ветрового давления по пролету ВЛ. Использование такого, «очищенного» от влияния различных, не зависящих от конструкции провода факторов, позволяет более четко определить вклад контура провода в изменение ветровой нагрузки.

Контур проводов после обжатия получали моделированием процесса пластического деформирования сталеалюминиевых проводов в модуле Abaqus/Explicit программного комплекса SIMULIA/Abaqus компании Abaqus, Inc. (USA). Полученные контуры проводов АСВП 216/33 в результате обжатия до заданного

КОНТУРЫ ПРОВОЛОК ПРОВОДОВ АСВП 216/33 ПОСЛЕ ОБЖАТИЯ ДО ЗАДАННОГО ДИАМЕТРА И ЦВЕТОВАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ РЕ: А — ОБЖАТИЕ ТОЛЬКО СВИТОГО ПРОВОДА; Б — ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ ОБЖАТИЕ СТАЛЬНОГО СЕРДЕЧНИКА И ОКОНЧАТЕЛЬНОЕ — СВИТОГО ПРОВОДА

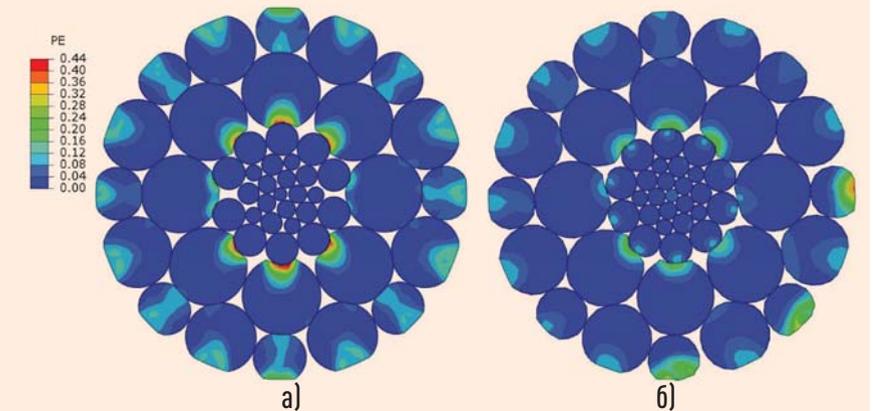


Рис. 2

диаметра и цветовая визуализация распределения пластических деформаций по элементам провода показаны на рис. 2. У всех проводов АСВП алюминиевые проволочки внешнего повива плотно без зазоров прилегают друг к другу, что позволяет моделировать в COMSOL Multiphysics воздействие ветра на единую систему с одним внешним контуром.

Ветровое давление, действующее на провода, и распределение скорости в воздушном потоке после обтекания сталеалюминиевых проводов типов АС по ГОСТ 839 и АСВП (СТО 71915393-ТУ 120-2012) с сечением алюминия около 230 мм² показано на рис. 3 и 4. Более гладкий контур и меньший диаметр проводов типа

АСВП позволяет уменьшить зону повышенного давления перед проводом (рис. 3б) и застойную зону за проводом (рис. 4б). Максимальное давление на провод типа АСВП меньше на 3,5 %, при этом зона с повышенным давлением имеет меньшую площадь по сравнению с аналогичными характеристиками для проводов типа АС. На поверхности выступающих витков алюминиевой проволоки провода АС, обращенной к фронту воздушного потока, значительно более выражено формирование нескольких локальных участков торможения воздуха с пониженным давлением.

Результаты расчета действующей на провод ветровой нагруз-

ГЕОМЕТРИЯ ИСПОЛЬЗОВАННОЙ МОДЕЛИ: 1 — СЕЧЕНИЕ ПРОВОДА, 2 — ВОЗДУШНЫЙ ПОТОК

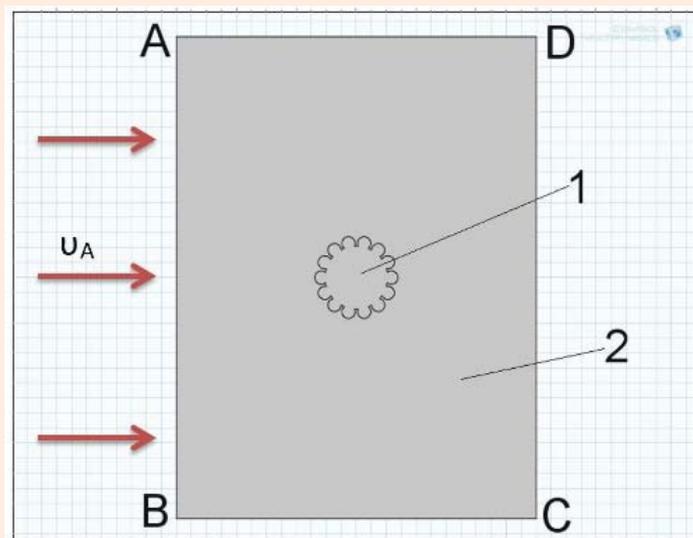


Рис. 1

На правах рекламы

ВЕТРОВОЕ ДАВЛЕНИЕ, ДЕЙСТВУЮЩЕЕ НА ПРОВОДА ПРИ СКОРОСТИ ВЕТРА 32 М/С (РАЙОН ПО ВЕТРУ IV): А — АС 230/34; Б — АСВП 216/33

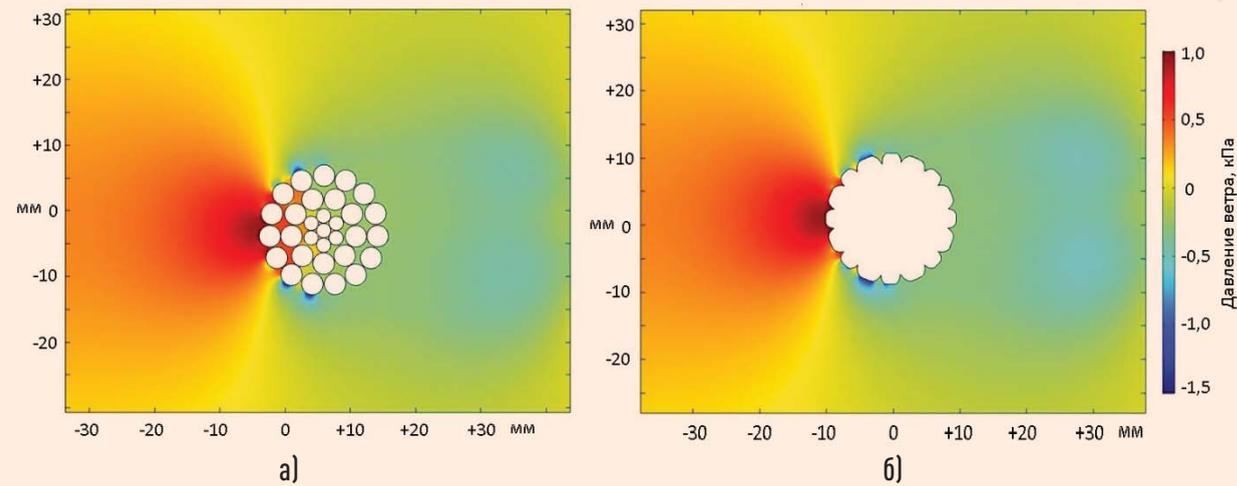


Рис. 3

ки по формуле (4) представлены в табл. 3.

Как видно из приведенных данных, ветровая нагрузка на провода типа АСВП с более обтекаемой геометрией в среднем ниже на 33 %. Снижение ветровой нагрузки позволяет уменьшить нагрузки на опоры линий электропередачи и монтировать при капитальных ремонтах провода с большей пропускной способностью на существующие опоры.

Пластически обжатые провода обладают еще рядом достоинств, которые обычно свойственны более дорогим проводам из профилированных проволок. Проведенные в испытательной лаборатории электрооборудования высоковольтных электрических сетей по требованиям электромагнитной совместимости (ИЛ ВЭС ЭМС) сравнительные испытания на коронный разряд неизолированных проводов показали [5], что в связи со сглаженным профилем провода АСВП конструкции ООО «Метсбыт-сервиса» напряжение возникновения

ЗНАЧЕНИЯ ВЕТРОВОЙ НАГРУЗКИ НА ПРОВОДА С РАЗЛИЧНЫМ КОНТУРОМ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СКОРОСТИ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА

Скорость $v_{вв}$, м/с	Ветровая нагрузка, действующая на провода следующих марок, Н/м					
	АСВП 128/37	АС 120/19	АСВП 216/33	АС 230/34	АСВП 277/79	АС 240/56
25	3,6	4,8	4,9	6,9	5,2	7,0
32	5,9	7,9	7,8	11,4	8,4	11,5
60	20,8	28,5	28,4	41,5	29,8	41,6

Таблица 3

коронного разряда на нем на 5,7 % выше напряжения возникновения коронного разряда на проводах марки АС, изготовленных по ГОСТ 839-80. По литературным данным известно, что нагрузки от действия гололедно-изморозевых отложений на компактированные провода с практически гладкой внешней поверхностью и уменьшенным диаметром снижаются на 3–9 % по сравнению со стан-

дартными витыми проводами марки АС того же сечения [6].

Интенсивная гололедно-ветровая пляска проводов воздушных линий электропередачи 6–750 кВ — одна из актуальных проблем электроэнергетики в странах с гололедно-ветровыми условиями работы. Близкая к гладкой наружная поверхность у пластически деформирован-

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТЕЙ В ВОЗДУШНОМ ПОТОКЕ, ПРИ СКОРОСТИ ВЕТРА 32 М/С (РАЙОН ПО ВЕТРУ IV): А — АС 230/34; Б — АСВП 216/33

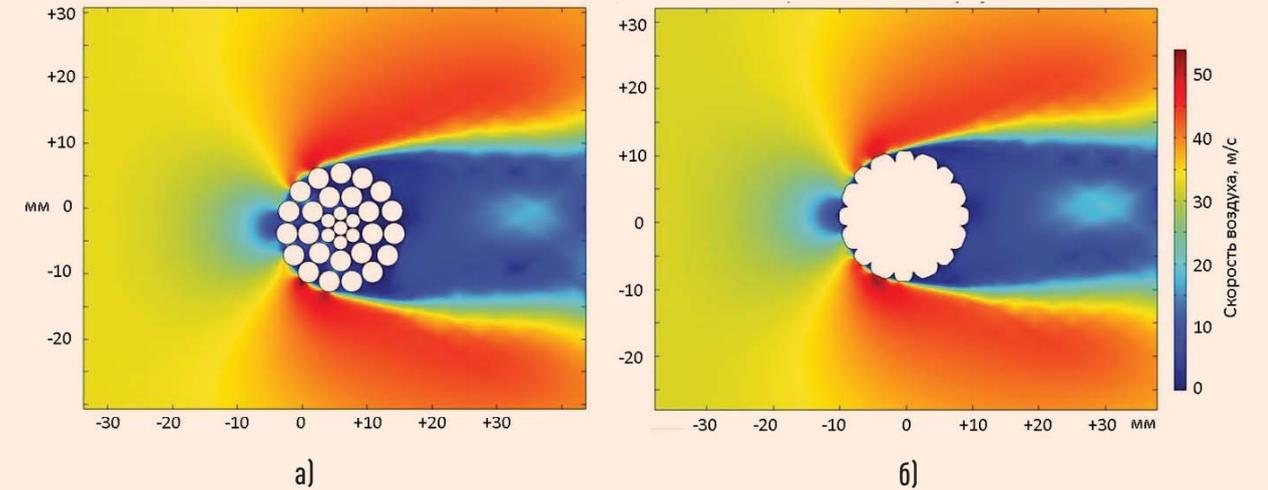


Рис. 4

ных проводов типа АСВП, близкая к гладкости профиля наружного слоя проводов из сегментных, омега- и Z-образных алюминиевых проволок позволяет уменьшить вибрацию и пляску проводов, налипание снега и льда. В то же время даже по сравнению с проводами из сегментных, омега- и Z-образных алюминиевых проволок провода АСВП должны обладать большей торсионной жесткостью, уменьшенной вероятностью пляски и повышенной стойкостью к вибрации, лучшим самодемпфированием, так как в отличие от них имеют развитую поверхность контакта соседних проволок не только внутри одного повива, но и между ними [7].

ВЫВОДЫ

1. Разработана методика оценки влияния ветровой нагрузки на провода ЛЭП различной конструкции, состоящая в использовании моделирования методом конечных элементов изменения

1. скорости и давления в воздушном потоке заданной скорости при обтекании провода.
2. Полученные расчетные данные свидетельствуют, что при использовании полученных пластических деформированных проводов с обтекаемой формой наблюдается снижение ветровой нагрузки на провода на 30 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Положение ПАО «Россети» «О единой технической политике в электросетевом комплексе». Утверждено Советом Директоров ПАО «Россети» (протокол от 22.02.2017 № 252). Москва, 2017 г.
2. Wang J. Overhead transmission line vibration and galloping // High Voltage Engineering and Application, 2008. ICHVE 2008. International Conference on. — IEEE, 2008. — С. 120–123.
3. Powers W.F. Oval shaped overhead conductor and method for making same : пат. 5171942 США. — 1992.
4. Правила устройства электроустановок ПЭУ (редакция 7), утвержденные приказом Министерства энергетики Российской Федерации от 8 июля 2002 г. № 204.

5. Протокол № В013-112016 ИЛ ВЭС ЭМС сравнительных испытаний на коронный разряд неизолированного провода марки АСВП 197/55 производства ООО «Энергосервис» и проводов марок АС 150/19, АС 185/29, АС 240/32, изготовленных по ГОСТ 839-80 (http://www.energyservice.com/files/Protokol_na_koronnoi_razryad.pdf).
6. Анализ технико-экономических характеристик проводов нового поколения / Ю.Ф. Васюра, М.А. Глазырин, Т.А. Плешкова, Г.А. Черепанова // Известия вузов. Электромеханика. 2015, №1 (537). С. 30–36.
7. Лопарев В.В., Образцов Ю.В. Об особенностях современных изолированных проводов для воздушных линий электропередачи // Кабели и провода, 2014, № 6 (349). С. 9–15.



www.metsbytservis.ru
(8442) 49-18-10
(495) 799-92-35