



ISSN 1814-5566 print

ISSN 1993-3517 online

**МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ
МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ
METAL CONSTRUCTIONS**

№2, ТОМ 16 (2010) 75-92

УДК 624.014.2: 621.315

(10)-0210-1

АНАЛІЗ ПРИЧИН І НАСЛІДКІВ АВАРІЙ НА ДІЛЯНКАХ ПЛ 330 кВ ДЖАНКОЙСЬКИХ МЕМ КРИМСЬКОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ НЕК "УКРЕНЕРГО"

Є. В. Горохов, С. М. Бакаєв, Я. В. Назім, В. В. Моргай, М. С. Попов

Донбаська національна академія будівництва і архітектури,

вул. Державіна, 2, м. Макіївка, Україна, 86123.

E-mail: mailbox@donnasa.edu.ua

Отримана 7 квітня 2010; прийнята 23 квітня 2010

Анотація. У статті розглянуто питання надійності електропостачання Автономної Республіки Крим на прикладі розслідування комісією резонансних аварій, що сталися на повітряних високовольтних лініях 330 кВ "Каховська — Джанкой", "Каховська — Острівська" і "Мелітопольська — Джанкой" в період з 18.12.09 р. по 12.02.10 р. Вивчено ожеледні відкладення на проводах ліній і опорах ПЛ. Визначено коефіцієнт перевищення фактичних навантажень на момент аварії над проектними даними. Розглянуто каскадне руйнування проміжних металевих опор типу ЦП-25І та виявлено джерело ініціювання пошкоджень. З метою визначення можливості подальшої експлуатації незруйнованих опор №№ 303 та 304 ПЛ 330 кВ "Каховська — Джанкой" виконана оцінка їх технічного стану, необхідність якої була викликана наслідками аварії проміжних опор №№ 305-318, що сталася в тому ж анкерному прольоті. У статті виконано аналіз працездатності повітряних ліній Кримської ЕС НЕК "Укренерго". Наведено організаційні та технічні заходи щодо недопущення подібних технологічних порушень та підвищення надійності ПЛ.

Ключові слова: повітряні лінії електропередавання (ПЛ), ожеледні відкладення, обстеження технічного стану опор, аварія, надійність.

АНАЛИЗ ПРИЧИН И ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИЙ НА УЧАСТКАХ ВЛ 330 кВ ДЖАНКОЙСКИХ МЭС КРЫМСКОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НЭК "УКРЭНЕРГО"

Е. В. Горохов, С. Н. Бакаев, Я. В. Назим, В. В. Моргай, М. С. Попов

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры,

ул. Державина, 2, г. Макеевка, Украина, 86123.

E-mail: mailbox@donnasa.edu.ua

Получена 7 апреля 2010; принята 23 апреля 2010

Аннотация. В статье рассмотрен вопрос надежности электроснабжения Автономной Республики Крым на примере расследования комиссией резонансных аварий, произошедших на воздушных высоковольтных линиях 330 кВ "Каховская — Джанкой", "Каховская — Островская" и "Мелитопольская — Джанкой" в период с 18.12.09 г. по 12.02.10 г. Изучены гололедно-изморозевые отложения на проводах линий и опорах ВЛ. Определен коэффициент превышения фактических нагрузок на момент аварии над проектными данными. Рассмотрено каскадное разрушение промежуточных металлических опор типа ЦП-25И и выявлен очаг инициирования повреждений. С целью определения возможности дальнейшей эксплуатации уцелевших опор №№ 303 и 304 ВЛ 330 кВ "Каховская — Джанкой" выпол-

нена оценка их технического состояния, необходимость которой вызвана последствиями разрушения промежуточных опор №№ 305-318, произошедшего в этом же анкерном пролете. В статье выполнен анализ работоспособности питающих воздушных линий Крымской ЭС НЭК "Укрэнерго". Приведены организационные и технические мероприятия по недопущению подобных технологических нарушений и повышению надежности ВЛ.

Ключевые слова: воздушные линии электропередачи (ВЛ), гололедно-изморозевые отложения, обследование технического состояния опор, авария, надежность.

FAILURE CAUSE AND CONSEQUENCE ANALYSIS AT THE HIGH-VOLTAGE (330 kV) LINE SECTIONS OF THE DZHANKOY LOCAL ELECTRICAL POWER STATION OF THE CRIMEAN ELECTRICAL POWER SYSTEM OF THE NEC "UKRENERGO"

E. V. Gorokhov, S. N. Bakayev, Ya. V. Nazim, V. V. Morgay, M. S. Popov

*Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,
Derzavin str. 2, Makeyevka, Ukraine, 86123.
E-mail: mailbox@donnasa.edu.ua*

Received 7 April 2010; accepted 23 April 2010

Abstract. The article is devoted to the problem of power supply reliability in the Autonomous Republic of Crimea illustrated by fact-finding of the resonant failures of the overhead high-voltage (330 kV) "Kakhovskaya – Dzhankoy", "Kakhovskaya – Ostrovskaya" and "Melitopol'skaya – Dzhankoy" lines in the course from December 18, 2009 to February 2, 2010. There have been investigated glaze-ice and rime depositions on the cables of high-voltage lines and towers. The coefficient of exceeding actual loads in comparison with the design ones at the moment of failure was determined. There was considered a cascade failure of the intermediate metal towers of the CP-25I type and the site of damage initiation was revealed. To specify the capability of a further operation of the survivor towers № 303 and 304 of the high-voltage (330kV) lines "Kakhovskaya – Dzhankoy" their technical state was estimated; a necessity of that estimation was caused by the consequences of the intermediate towers № 305-318 damage which occurred in the same anchor span. The article comprises the analysis of the operating capacity of the supply overhead power transmission lines of the Crimean power station of the NEC "Ukrenergo". There are given organizational and technical arrangements not to allow any similar technological disturbance and to increase the high-voltage line reliability.

Keywords: overhead power transmission line, glaze-ice and rime depositions, tower technical state survey, failure, reliability.

1 Введение

На сегодняшний день вся электроэнергетическая система Автономной Республики Крым связана с Объединенной Электроэнергетической Системой Украины всего четырьмя воздушными магистральными линиями электропередачи, три из которых напряжением 330 кВ ("Мелитопольская – Джанкой", "Каховская – Джанкой" и "Каховская – Островская", протяженность соответственно 200,3; 151,3; 137,9 км, введены в эксплуатацию в 1970; 1969; 1978 г.) и одна – напряжением 220 кВ ("Титан – Красноперекоск", общая протяженность линии 32,8 км, введена в эксплуатацию 1962 г.). Поскольку в Крыму отсутствуют электрогенерирующие предприятия,

очевидна прямая зависимость надежности электроснабжения потребителей полуострова от надежности вышеперечисленных ВЛ как в целом, так и их составных частей.

В значительной степени аварийность ВЛ обусловлена недостаточным учетом всех климатических факторов в зоне прохождения трасс ВЛ. Статистика аварийных ситуаций свидетельствует, что более половины отказов элементов ВЛ вызвано действием сверхрасчетных гололедно-ветровых нагрузок на провода, тросы и строительные конструкции [1-3]. Обычно они являются следствием недоучета при проектировании фактических ветровых и гололедных нагрузок, а также их сочетаний.

Существенным отличием воздушных линий электропередачи от всех других типов сооружений является их большая протяженность. Вследствие этого не исключена возможность попадания отдельных участков ВЛ в зоны, где микроклимат существенно отличается от расчетных климатических условий района строительства [4-6].

Зимой 2009-2010 года произошло несколько крупных аварий на линиях электропередачи АР Крым. По данным первого заместителя Министра промышленной политики, транспорта, связи и ТЭК Крыма Вадима Жданова [7], только в первые дни гололедно-ветрового шторма (18-20.12.2009 г.) из-за разгула стихии оказались отключенными от электроэнергетики 52 населенных пункта автономии. Причиной тому явились метеорологические условия, при которых над территорией Крыма, как и над всем европейским континентом, явилось распространение масс холодного арктического воздуха. Это привело к столкновению с ним теплых, насыщенных влагой масс воздуха, сформированных над Азовским и Черным морями и над Крымом. В результате практически над всем полуостровом пошел дождь или мокрый снег, которые создали обледенение строений, объектов инфраструктуры и растительного покрова полуострова. На опорах и проводах четырех высоковольтных линий, по которым передается электроэнергия для крымских потребителей, образовалось огромное количество льда.

Наиболее масштабное повреждение ВЛ произошло на высоковольтной линии напряжением 330 кВ "Каховская — Джанкой" (рис. 1, 2). Она проходит через сравнительно высокое плато на входе в Крым по Красноперекопскому перешейку. Возле села Филатовка Красноперекопского района было полностью разрушено 14 опор на участке ВЛ длиной более 5,5 км. В результате вся линия 330 кВ "Каховская — Джанкой", питающая сотни тысяч потребителей в Крыму, вышла из строя. Одновременно с этим, из-за обрывов проводов и в связи с отключениями на двух других линиях, а также отсутствием электрогенерирующих компаний в АР Крым, эти события представляли существенную угрозу электроснабжению всей автономии.

За указанной аварией последовали еще ряд технологических нарушений на ВЛ, которые продолжались весь зимний период (см. рис. 24).

На сегодняшний день персоналом Крымской электроэнергетической системы НЭК "Укрэнерго", коллегами из Южной электроэнергетической системы, подрядчиками ООО "СПМК-32 "Крымэлектроводмонтаж" завершены восстановительные работы поврежденных линий электропередачи Крыма, возникших в результате аварий в период с 18 декабря 2009 года по 12 февраля 2010 года в северной части полуострова.

Ниже приводится анализ результатов аварий.

2 Авария на ВЛ 330 кВ "Каховская — Джанкой". Работа комиссии по расследованию технологического нарушения

Приказом № 258 Крымской ЭС НЭК "Укрэнерго" от 21.12.2009 г. была создана комиссия по расследованию технологических нарушений, произошедших на ВЛ 330 кВ "Каховская — Островская" 18.12.2009 г. и на ВЛ 330 кВ "Каховская — Джанкой" 19.12.2009 г. В состав комиссии вошли руководство СЛ НЭК "Укрэнерго" (Любенко М.Н.), представители Крымской ЭС (Горак О.И., Савин В.Ф., Долгачев А.Г. и др.), старший инспектор ГИ по эксплуатации электрических станций и сетей в Крыму (Антоновский С.М), представители СНПЦ КЭС ДонНАСА (Бакаев С.Н., Моргай В.В.), главный специалист технолог ГПИ и НИИ "Укрэнергосетьпроект" Свид А.В. Основной задачей комиссии было определить причины аварий и разработать организационные и технические мероприятия по недопущению подобных нарушений.

Результаты расследования аварий, анализ их причин и последствий докладывались и обсуждались в г. Киев на расширенном научно-техническом совете НЭК "Укрэнерго", в работе которого принимали участие представители ДонНАСА (Назим Я.В.).

Непосредственно перед представителями СНПЦ КЭС ДонНАСА были поставлены следующие задачи:

- обследование гололедно-изморозевых отложений;

- расчёт коэффициентов превышения фактических нагрузок над расчётными;
- анализ причин повреждений строительных конструкций ВЛ с целью определения объема и состава работ по обследованию уцелевших в пролете опор №№ 303-304 ВЛ "Каховская — Джанкой";
- детальное натурное освидетельствование строительных конструкций опор, т.е. выявление дефектов и повреждений опор с применением визуальных и инструментальных методов контроля;
- оценка технического состояния объектов на основании результатов натурального освидетельствования опор с учетом реальных условий на предмет возможности их дальнейшей эксплуатации;
- разработка мероприятий по повышению несущей способности и продлению срока службы конструкций ВЛ.

2.1 Обследование гололедно-изморозевых отложений на участке (пролет 302-319) ВЛ 330 кВ "Каховская — Джанкой"

Комиссия в составе представителей Крымской ЭС и СНПЦ КЭС ДонНАСА произвела обследование гололедно-изморозевых отложений, возникших на ВЛ 330 кВ на территории АР Крым в период с 18 по 20 декабря 2009 года.

В результате обследования установлено, что 19 декабря 2009 года на проводах ВЛ 330 кВ "Каховская — Джанкой" началось отложение плотного льда (рис. 3) при температуре наружного воздуха +2°C скорость ветра составляла 15-20 м/с с порывами до 25 м/с, обледенение сопровождалось пляской проводов. Также было зафиксировано обледенение металлических конструкций опор ВЛ (рис. 4). При выезде на место повреждения ВЛ 330 кВ "Каховская — Джанкой" были взяты образцы гололедно-изморозевых отложений с проводов указанной ВЛ (рис. 5, 6). На участке (пролет 302-319) ВЛ 330 кВ "Каховская — Джанкой" взят образец гололедно-изморозевого отложения на проводе длиной 0,80 м. Масса гололедно-изморозевого отложения при взвешивании составила 4,824 кг.

Удельная нагрузка на 1 м провода составила:

$$g = m/l = 4,824/0,8 = 6,03 \text{ кг/м.}$$

Размеры образца гололедно-изморозевого отложения: большой диаметр — $a=10,2$ см; малый диаметр — $c=8,9$ см.

Плотность гололедно-изморозевого отложения составила:

$$\gamma = \frac{G}{\frac{\pi}{4} \cdot (a \cdot c - d^2) \cdot l} = \frac{4824}{\frac{3,14}{4} \cdot (10,2 \cdot 8,9 - 2,75^2) \cdot 80} = 0,923 \text{ г/см}^3.$$

Эквивалентная стенка гололеда на проводе ВЛ составила: $b=33,9$ мм.

Расчет эквивалентной стенки гололеда для провода эталонного диаметра ($d_э=1$ см):

$$b = \sqrt{\frac{G}{\pi \cdot \gamma \cdot l} + \frac{d_э^2}{4} - \frac{d_э}{2}} = \sqrt{\frac{4824}{3,14 \cdot 0,923 \cdot 80} + \frac{1^2}{4} - \frac{1}{2}} = 4,26 \text{ см.}$$

Эквивалентная стенка гололеда для провода эталонного диаметра ($d_э=1$ см) составляет: $b=42,6$ мм.

2.2 Расчет фактических нагрузок на участке (пролет 302-319) ВЛ 330 кВ "Каховская — Джанкой" во время стихийных явлений 19 декабря 2009 года

Согласно данным ГПИиНИИ "Укрэнергосеть-проект" участок ВЛ 330 кВ "Каховская — Джанкой" (опоры №302-319) был запроектирован в 1966 году согласно ПУЭ 1965 г. (4-е издание) на следующие **проектные условия**:

Толщина стенки гололеда $c=15$ мм. Максимальный ветровой напор — $Q_m=50$ дан/м². Напор ветра при гололеде — $Q_r=14$ дан/м². Провод АСКО — 400 $d=27,2$ мм, $S=441,5$ мм². Трос С-70 $d=11$ мм, $S=72,2$ мм². Температура $t_э=10^0$ С, $t_r=-5^0$ С, $t_л=-30^0$ С, $t_m=40^0$ С. Район с интенсивной пляской проводов. Максимальное расчетное напряжение в проводе на данном участке $\sigma_m=9,95$ дан/мм².

2.2.1 Данные на момент аварии

Марка провода 2АСО — 400. Диаметр провода — $d=27,5$ мм. Линейный вес провода $p=1,49$ кг/м. Пролет — $L=360$ м. Удельная нагрузка на 1 м провода — $g=6,03$ кг/м. Большой диаметр —

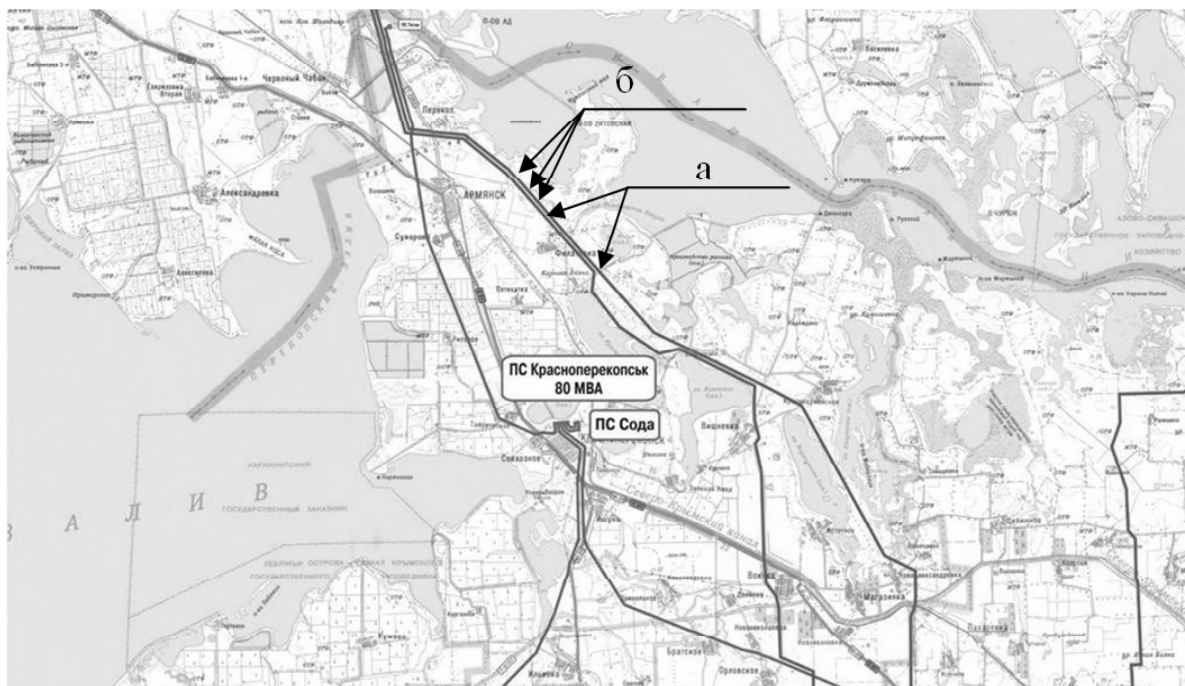


Рис. 1. Аварии на ВЛ 330 кВ "Каховская – Джанкой" 19.12.09 г.: а) отказ первой категории – повреждены металлоконструкции опор типа ЦП 25И (№№303-318); б) отказ второй категории – повреждены узлы крепления гирлянд изоляторов на опорах №277 (обрыв скобы СК12), №№279-280 (разрыв КГП 12-1).



Рис. 2. Общий вид поврежденного участка ВЛ 330 кВ "Каховская – Джанкой".

$a=102$ мм. Малый диаметр — $c=89$ мм, фактическая эквивалентная стенка гололеда на проводе ВЛ составляет — $b=33,9$ мм. Эквивалентная стенка гололеда для провода эталонного диаметра ($d_э=1$ см) составляет — $b=42,6$ мм. Скорость ветра при стихийных явлениях составляла — 15...20 м/с, с порывами до 25 м/с.

2.2.2 Результаты расчета ВЛ 330 кВ "Каховская — Джанкой"

Исходя из данных таблицы 2, видно, что фактические нагрузки, влияющие на конструкции опор, превышали расчетные в два-четыре раза.



Рис. 3. Замер гололедно-изморозевых отложений на проводах в полевых условиях.



Рис. 4. Фрагменты гололедно-изморозевых отложений с поясного уголка опор.



Рис. 5. Фрагменты гололедно-изморозевых отложений с провода и чашки изолятора.

2.3 Разрушение металлоконструкций опор ВЛ 330 кВ "Каховская – Джанкой" (пролет 302-319)

В результате сложившихся 19 декабря 2009 года метеоусловий в районе Красноперекопского Перешейка было полностью разрушено 14 промежуточных опор типа ЦП 25 И.

Масштаб произошедшей аварии иллюстрируют представленные ниже фотографии (рис. 7-20).

2.4 Заключение СНПЦ КЭС ДонНАСА о повреждении, произошедшем на участке ВЛ 330 кВ "Каховская – Джанкой" (пролет 302-319) во время стихийных явлений 19 декабря 2009 года

В результате обследования установлено, что 19 декабря 2009 года на проводах ВЛ 330 кВ "Каховская – Джанкой" началось отложение стекловидного льда [3, 9] при температуре наружного воздуха $+2^{\circ}\text{C}$, скорость ветра составляла 15-20 м/с с порывами до 25 м/с. Обледенение сопровождалось интенсивной пляской проводов. Традиционно пляска проводов наиболее вероятна в режиме гололедно-ветровых нагрузок при сочетании условий, способствующих возникновению и развитию динамических колебаний проводов. Явление пляски проводов [3, 13, 14] вызывается действием обычного сильного порывистого ветра, дающего полный или неполный резонанс с собственными колебаниями провода основной или высших частот. Возникает пляска в результате появления подъемной силы, действующей на провод против силы

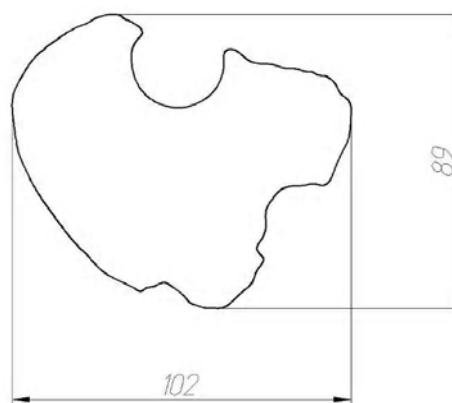


Рис. 6. Эскиз образца гололедно-изморозевого отложения на проводе ВЛ 330 кВ "Каховская – Джанкой".

тяжести и превышающей последнюю до некоторого момента. Подъем провода выше его среднего положения прекращается вследствие уменьшения подъемной силы и возрастания противодействующих подъему сил упругости провода. После этого провод возвращается в среднее положение и отклоняется по инерции в обратном от него направлении.

Несмотря на относительно небольшое возрастание величины тяжения при синфазных колебаниях проводов в многопролетной системе, наряду с отклонениями гирлянд изоляторов на траверсах и теле опоры, приложенный к ним вектор суммарных сил механических воздействий с частотой колебаний меняет свое

направление в соответствии с величиной горизонтального отклонения гирлянды изоляторов. При этом возникает динамическая горизонтальная составляющая суммарных сил воздействий. Если в режиме статических нагрузок эта составляющая за счет баланса сил равна нулю, то при пляске она действует перпендикулярно траверсам и телу опоры, т.е. приложена на максимально возможные плечи воздействий на них в направлении их наименьшей механической прочности и по амплитуде может достигать значений, превышающих прочность элементов опор. Такое пере-

распределение сил является основной причиной возникновения аварий на ВЛ при пляске проводов.

Возникающие при пляске проводов циклические динамические нагрузки разрушают в первую очередь узлы и детали, имеющие жесткую конструкцию и воспринимающие максимальные нагрузки. В рассматриваемом случае это оказался разрыв узла крепления гирлянды изоляторов на фазе "А" опоры №310 (см. рис. 15).

При этом **авария имела следующую последовательность:**

Таблица 1. Сравнение нормативных нагрузок на погонный метр провода для соответствующих расчетных режимов с фактическими нагрузками во время стихийных явлений 19 декабря 2009 года.

Вид нагрузки	Значение нагрузки			
	Проект (ПУЭ 1965)	Фактическая нагрузка		Коэффициент превышения
		d=27,5	d=10	
Стенка гололеда, мм	15	33,9	42,6	2,3 (2,8)
Вес гололеда, кг/м	2,04	6,03	6,03	3,0
Вес провода с гололедом, кг/м	3,96	7,95	-	2,0
Ветровое давление (максимальное), кг/м ²	50	-	-	-
Ветровое давление при гололеде, кг/м ²	14	39	39	2,8
Действие ветра на провод ВЛ с гололедом, кг/м	0,97	3,84	3,84	4,0

Таблица 2. Сравнение нормативных нагрузок для соответствующих расчетных режимов с фактическими нагрузками во время стихийных явлений 19 декабря 2009 года.

Нагрузки на опору ВЛ ЦП-25и	Значение нагрузки			
	Проект (ПУЭ 1965)	Фактическая нагрузка		Коэффициент превышения
		d=27,5	d=10	
Вес гололеда на проводах ВЛ, кг	1470	4342	4342	3,0
Вес проводов ВЛ с гололедом, кг	2850	5722	-	2,0
Ветровое давление на провода ВЛ (максимальное), кг	845	-	-	-
Действие ветра на провода ВЛ с гололедом, кг	700	2766	2764	4,0



Рис. 7. Опора №318.



Рис. 8. Опора №317.



Рис. 9. Опора №316.



Рис. 10. Опора №315.



Рис. 11. Опора №314.



Рис. 12. Опора №313.



Рис. 13. Опора №312.



Рис. 14. Опора №311.



Рис. 15. Опора №310.



Рис. 16. Опора №308.



Рис. 17. Опора №309.



Рис. 18. Опора №306.



Рис. 19. Опора №305.



Рис. 20. Опора №307.

- инициирование аварии произошло в пролете между опорами №№ 309-311 в результате обрыва двух проводов фазы "А" на опоре № 310 из-за одновременного воздействия сверхрасчетных гололедно-ветровых нагрузок и пляски проводов (опора №310 оказалась единственной с неповрежденным стволом в пролете 305-318 по причине обрыва арматуры узла крепления гирлянды изоляторов);

- провода фазы "А" на опоре № 310 упали на нижнюю траверсу (фаза "С"), чем было обусловлено ее разрушение;
- динамическое воздействие от одновременного падения проводов двух фаз (фаза "А" и фаза "С") в пролете №№ 309-311 вызвало перераспределение усилий, действующих на опоры № 309 и №311, что при одновременном действии со сверхрасчетными гололедно-ветровыми

нагрузками обусловило падение данных опор;

- каскадное распространение аварии в противоположные стороны к опорам № 303 и №318.

Основными причинами повреждений, произошедших на участке 302-319 ВЛ 330 кВ "Каховская — Джанкой" во время стихийных явлений 19 декабря 2009 года являются:

- отличие микроклимата от расчетных климатических условий района строительства [6];
- интенсивное образование сверхнормативных гололедно-изморозевых отложений высокой плотности, имевшее место 19 декабря 2009 года, тип отложений — гололед стекловидный (см. п. 2.1);
- действие сверхрасчетных гололедно-ветровых нагрузок на провода, тросы и строительные конструкции в результате интенсивного гололедообразования (см. п. 2.2);
- интенсивная пляска проводов, возникшая при сочетании условий, способствующих возникновению и развитию динамических колебаний проводов (подтверждается данными видеосъемки колебаний проводов уцелевших пролетов ВЛ в последующие дни после аварий);
- циклические динамические нагрузки, воздействующие на узлы крепления изоляторов, имеющие жесткую конструкцию и воспринимающие максимальные нагрузки (причем возникающая при пляске величина динамической горизонтальной составля-

ющей приложена в направлении наименьшей механической прочности узла).

2.5 Обследование технического состояния опор уцелевших №№ 303-304 ВЛ 330 кВ "Каховская — Джанкой"

Авария, произошедшая 19 декабря 2009 года, в результате которой были разрушены промежуточные опоры №№ 305-318, потребовала выполнить оценку технического состояния опор №№ 303 и 304, находящихся в том же анкерном пролете, на предмет возможности их дальнейшей эксплуатации. Для выполнения данных работ был заключен договор между СНПЦ КЭС ДонНАСА и ООО "СПМК-32 "Крым-электропроводмонтаж" (генподрядчик по ликвидации последствий аварии).

Натурным обследованием строительных конструкций опор №№ 303-304 воздушной линии электропередачи выявлены и установлены дефекты и повреждения (см. рис. 22).

Рассматриваемые опоры являются промежуточными типа ЦП-25И. Опоры в конструктивном отношении — башенные свободностоящие, выполнены из углового проката, болтовые, оцинкованные. Фундаменты опор выполнены в виде железобетонных подножников. На пути прохождения участка ВЛ наблюдается в основном спокойный рельеф местности, рассматриваемый участок ВЛ расположен близ озера Сиваш, что способствовало интенсивному гололедообразованию.

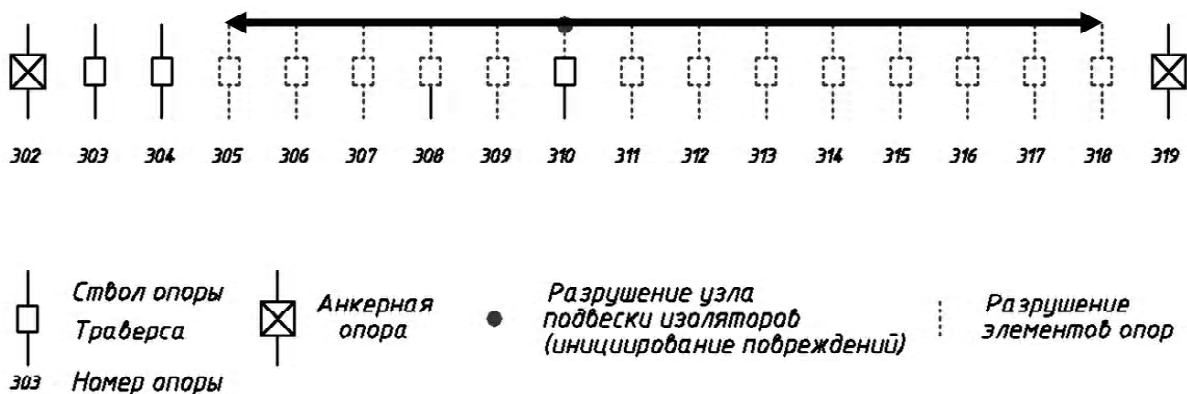


Рис. 21. Схема распространения аварии на ВЛ 330 кВ "Каховская — Джанкой".

В соответствии с действующими на Украине нормами [10-12] техническое состояние строительных конструкций опор №№ 303-304 ВЛ 330 кВ "Каховская – Джанкой" было признано аварийным. Ввиду ответственности элементов конструкций и наличия дефектов и повреждений, свидетельствующих о потере несущей способности и о возможном обрушении конструкции при подвешивании проводов и тросов вновь проектируемого участка линии (анкерный пролет 302-319) а также из-за воздействия аварийных нагрузок на рассматриваемые опоры (в несколько раз превышающих расчетные), последующая эксплуатация опор №№ 303-304 признана невозможной. Опоры №№ 303-304 было рекомендовано демонтировать и запроектировать новые опоры на участке ВЛ 330 кВ "Каховская – Джанкой" (анкерный пролет 302-319) с учетом реальных климатических нагрузок.

2.6 Ликвидация последствий аварии на участке ВЛ 330 кВ "Каховская – Джанкой" №№ 302-319

Крымские энергетики с помощью своих коллег из НЭК "Укрэнерго" и ГПИ и НИИ "Укрэнергосетьпроект" в ускоренном режиме разработали проект реконструкции и аварийного восстановления линий, собрали необходимые материалы, а также кадры. К работе были подключены специалисты не только Крымской электроэнергетической системы и "Крымэнерго", но и электрики из Одесской области – Южной электроэнергетической системы, а также ООО "СПМК-32 "Крымэлектроводмонтаж".

Работы по восстановлению линии координировали первый заместитель директора - главный инженер НЭК "Укрэнерго" Григорий Григуд и заместитель министра промышленной

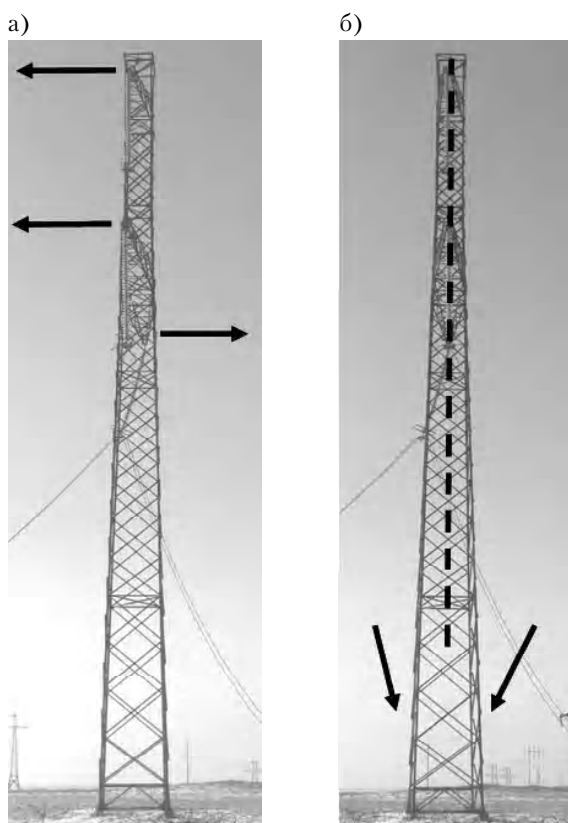


Рис. 22. Закручивание ствола и траверс опоры №303: а) вид со стороны 2-ой грани при совмещении пересечений раскосных уголков на одной линии; б) вид со стороны 2-ой грани при совмещении осей траверс на одной линии.

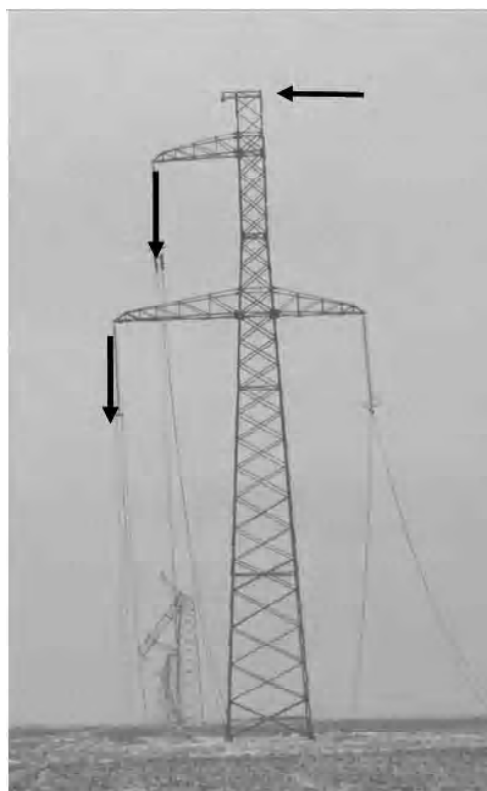


Рис. 23. Крен верхней секции ствола опоры №304, выход из горизонтального положения траверс фазы "А" и фазы "С".

политики, транспорта, связи и ТЭК Вадим Жданов. Для восстановления линии были задействованы в разные дни от 120 до 150 специалистов. Работать людям приходилось в условиях резкой смены температур (то низких до минус 15-20 градусов, то потепления до плюс 5 градусов), осадков в виде дождя и мокрого снега, сильного ветра и на большой высоте. Работа линии была восстановлена к утру 28 января 2010 года и электроэнергия подана потребителям.

3 Аварии на участках ВЛ 330 кВ "Каховская — Островская" и "Мелитопольская — Джанкой" зимой 2009-2010 года

Наряду со столь масштабной по своим последствиям аварией, каковым являлось каскадное падение металлических опор на участке ВЛ 330 кВ "Каховская — Джанкой", не стоит забывать о более мелких авариях (отказы второй категории), которые произошли на участках

ВЛ 330 кВ "Каховская — Островская" и "Мелитопольская — Джанкой" 18 декабря 2009 года, 20 января 2010 года и 12 февраля 2010 года. Все они были также вызваны действием гололедно-ветровых нагрузок на провода и интенсивной пляской проводов и заключались в падении провода в результате либо разрыва КГП, либо обрыва скобы СК.

В связи с тем, что на данных участках ВЛ были либо применены железобетонные опоры portalного типа ПВС-330АМ с горизонтальной подвеской проводов, либо в случае металлических опор типа ЦП-25И происходил обрыв проводов нижних фаз, которые просто падали или провисали, не повреждая другие конструктивные элементы опор, аварии с недоотпуском электроэнергии не получили большого резонанса, поскольку последствия были устранены в кратчайшие сроки.

Этот пример показывает, что применение превентивных методов, таких как изменение координации прочности путем снижения

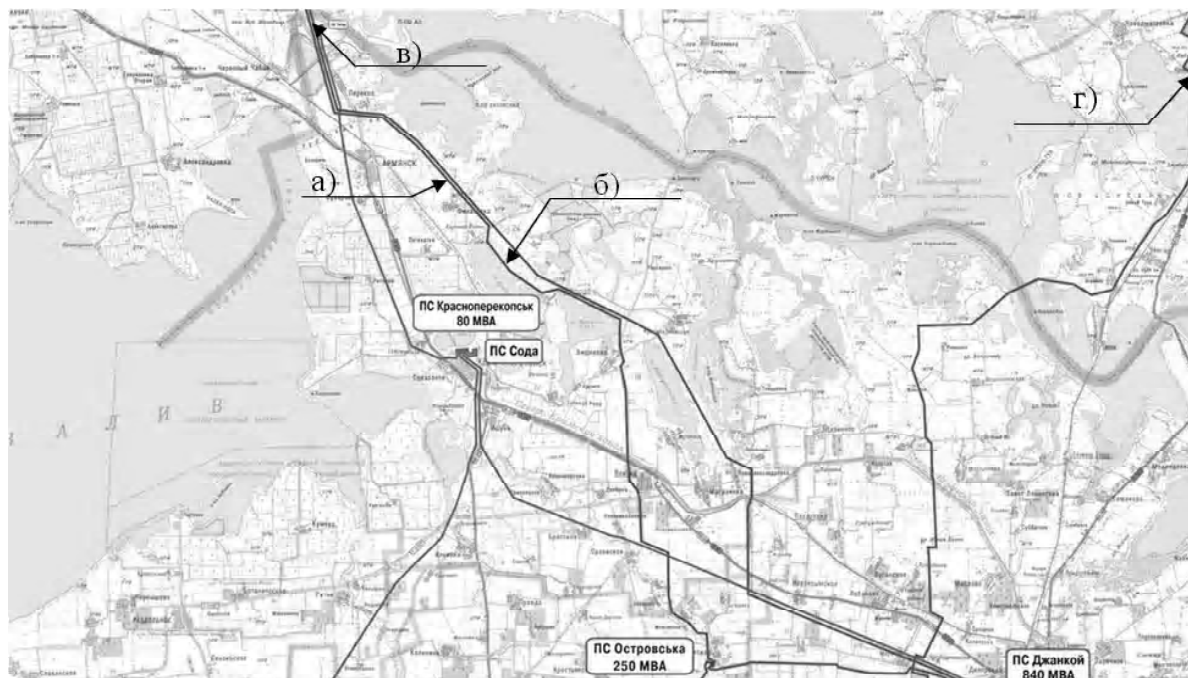


Рис. 24. Отказы второй категории на участках ВЛ 330 кВ: а) опора №260 ВЛ 330 кВ "Каховская — Островская" 18 декабря 2009 года (разрыв КГП 16-3); б) опора №299 ВЛ 330 кВ "Каховская — Островская" 20 января 2010 года (разрыв КГП 12-1); в) опора №196 ВЛ 330 кВ "Каховская — Островская" 12 февраля 2010 года (разрыв КГП 12-1); г) опора №473 ВЛ 330 кВ "Мелитопольская — Джанкой" 12 февраля 2010 года (разрыв КГП 12-1).

несущей способности гирлянды изоляторов, может способствовать снижению повреждений при каскадном распространении аварий.

Но даже при этом Крымская ЭС столкнулась с большой токовой загрузкой уцелевших ВЛ. Стоит задуматься: а что, если бы все отключения прошли почти одновременно, либо оборвались КГП верхних фаз с падением на нижерасположенные конструкции, и далее пошло бы каскадное разрушение опор, как в случае с ВЛ 330 кВ "Каховская — Джанкой"? Справились бы с этим всего лишь четыре воздушные высоковольтные линии, питающие АР Крым, при полном отсутствии генерирующих компаний на полуострове?

4 Анализ работоспособности воздушных линий Крымской ЭС

Анализ работоспособности ВЛ Крымской ЭС различных классов напряжения показывает, что:

- прохождение трасс в загрязненной среде — вблизи побережий Черного и Азовского морей, соленого озера Сиваш с интенсивным засолением, промузлов, в том числе Армянско-Перекопского, приводит к повышенному износу ВЛ;
- длительная эксплуатация воздушных линий при потенциально высоких скоростях ветра делает существующую схему электропитания Крыма всё менее надежной и чрезвычайно чувствительной к экстремальным проявлениям внешних климатических факторов — ветра и колебаний провода при гололёде;
- частая интенсивная пляска проводов, характерная для данной местности, и возникающие при этом циклические динамические нагрузки разрушают узлы и элементы ВЛ.

На техническое состояние линий электропередачи существенное влияние оказывают климатические условия, в которых проходят трассы ВЛ. Крымский регион характеризуется гололедными явлениями, показатели которых существенно превышают среднестатистические данные по Украине. За последние 10-15 лет погодные условия в Украине, в том числе и в Крыму, характеризуются увеличением среднегодовой продолжительности погоды, приводящей к гололедно-изморозевым отложениям. Соответственно, увеличивается и частота ава-

рий, связанных с гололедно-ветровыми явлениями. Вероятность аварии (по меньшей мере, одной из четырех ВЛ) и потери до 20-25% передаваемой в Крым мощности возрастает с каждым годом.

5 Организационные и технические мероприятия по недопущению подобных технологических нарушений и повышению надежности воздушных высоковольтных линий электропередачи

Надежность работы ВЛ реализуется через множество взаимозависимых составляющих: начиная от разработки и изготовления большого количества разнотипного оборудования и материалов, качества проектов, строительно-монтажных работ, ввода в действие и эксплуатацию в различных режимах и атмосферно-климатических условиях. Снижение надежности работы электрических сетей особенно характерно для гололедных районов, где воздушные линии электропередачи подвержены опасным метеорологическим воздействиям. Несмотря на многолетние усилия энергоэнергетиков, гололедные аварии в электрических сетях многих энергосистем по-прежнему относятся к наиболее тяжелым и периодически дезорганизуют электроснабжение регионов.

Отрицательное воздействие гололеда усиливается при возникновении пляски проводов и тросов. Односторонние отложения гололеда при воздействии ветра на провода и тросы создают условия, аналогичные аэродинамической подъемной силе, действующей на крыло самолета. Амплитуда и частота пляски зависят от силы и направления ветра, формы гололедных отложений и конструктивных особенностей линии.

Анализ статистических данных по многим регионам показывает, что к числу основных причин гололедных аварий относятся недостатки в проектировании и сооружении ВЛ, причем часто это не вина проектировщиков. Желание оптимизировать затраты на строительство линий электропередач, особенно напряжением 220 кВ и выше, не позволяет заказчику включать в технические требования к проектируемой ВЛ повышение ее механических свойств путем применения усиленных

конструкций опор, арматуры, изоляции, а также сокращение пролетов проводов между опорами.

Практикой эксплуатации доказано, что предотвращение гололедных аварий и существенное повышение надежности ВЛ возможно применением комплексной системы мероприятий [15-21]. Из всех составляющих этой системы можно выделить следующие:

- внедрение изоляционных междуфазных распорок и гасителей пляски проводов;
- внедрение схем плавки гололеда на проводах и тросах;
- внедрение проводов новых типов с улучшенными аэродинамическими характеристиками и в меньшей степени подверженных образованию гололеда;
- внедрение автоматизированной информационной системы наблюдения за гололедом [22-24];
- проектирование линий, способных выдерживать пляску за счет увеличения запасов при проектировании, повышения изоляционных расстояний.

При осуществлении комплексного подхода к решению проблемы обеспечения надежности электроснабжения необходима также разработка новых и пересмотр существующих отраслевых нормативно-технических документов с учетом анализа их эффективности, отечественного и международного опыта.

Передача электроэнергии потребителям должна обладать высоким уровнем надежности, при этом система электропередачи должна быть готова противостоять даже самым масштабным непредвиденным обстоятельствам, иметь резервы питания либо собственную генерацию электроэнергии. В планах НЭК "Укрэнерго" — сооружение дополнительной межсистемной ВЛ 330 кВ "Каховская — Западно-Крымская", монтаж кабельной вставки постоянного тока "Каховская — Западно-Крымская". Данный комплекс мероприятий безусловно поднимет надежность Крымской ЭС на новый уровень.

Литература

1. Повышение надежности и долговечности электросетевых конструкций / Горохов Е.В., Шаповалов С.Н., Удод Е.И. и др. / Под редакцией Горохова Е.В. — К.: Техніка, 1997. — 284 с.

2. Аэродинамика электросетевых конструкций / Горохов Е.В., Казакевич М.И., Шаповалов С.Н., Назим Я.В. / Под ред. Горохова Е.В., Казакевича М.И. — Донецк, 2000. — 336 с.
3. Гололедные и ветровые воздействия на воздушные линии электропередачи / Горохов Е.В., Казакевич М.И., Турбин С.В., Назим Я.В. / Под ред. Горохова Е.В. — Донецк, 2005. — 348 с.
4. Кліматичне забезпечення будівництва та експлуатації електричних мереж. — К.: ОЕП "ГРІФРЕ". — 2008. — 35 с.
5. Назим Я.В., Лещенко А.А., Костин В.В. Внедрение новых разработок нормативной документации в сфере климатического обеспечения электросетей в практические расчеты // Вестник ДонНАСА. — Макеевка. — 2009. — Вып. 2009-5(79). — С. 22-25.
6. Назим Я.В., Лещенко А.А., Костин В.В. Сравнительный анализ подходов к определению климатических нагрузок на ВЛ на примере Крымской ЭС // Металеві конструкції. — Макеевка, 2010. — Том 16, №1. — С. 61-74.
7. Пресс-служба Совета Министров АРК 27.01.2010.
8. Осадчий Б.М., Бакаев С.Н., Моргай В.В., Турбин С.В. О проблемах эксплуатации строительных конструкций электрических подстанций 330 кВ Одесского региона // Новини енергетики. — К., 2004. — №9. — С. 13-17.
9. Бучинский В.Е. Атлас обледенения проводов. — Л.: Гидрометеиздат, 1966. — 116 с.
10. СОУ-Н ЕЕ 20.571:2007. Оцінка технічного стану повітряних ліній електропередавання напругою від 35-750 кВ. Частина 1. Металеві та залізобетонні опори. Паспортизація ліній — НТСЕУ, ОЕП "ГРІФРЕ", 2007. — 124 с.
11. Инструкция по расследованию и учету техногенных нарушений в работе электростанций, сетей и энергосистем Минэнерго Украины. — К.: 1994. — 50 с.
12. ДБН В 1.2.1-95. Положення про розслідування причин аварій (обвалень) будівель, споруд, їх частин та конструктивних елементів / Держкоммістобудування України. — К.: Укрархбудінформ, 1995. — 21 с.
13. Современный подход к проблеме пляски проводов. Брошюра СИГРЭ № 322. — Париж, 2007. — 140 с.
14. Колебания проводов воздушных линий под воздействием ветра. Учебно-справочное пособие. — М.: ЗАО ЭССП, 2005. — 185 с.
15. Нейман В.А. Нормирование прочности ВЛ по критериям надежности // Энергетика и электрификация. — К., 1998. — №5. — С. 11-15.
16. Дьяков А.Ф. Системный подход к проблеме предотвращения и ликвидации гололедных аварий в энергосистемах. — М.: Энергоатомиздат, 1987.
17. Дьяков А.Ф., Засыпкин А.С., Левченко И.И. Предотвращение и ликвидация гололедных аварий в электрических сетях энергосистем. — Пятигорск: Изд-во РП "Южэнерготехнадзор", 2000.
18. Каверина Р.С. Повышение надежности ВЛ при воздействии гололеда // Материалы Второй

- Российской с международным участием научно-практической конференции "Линии электропередачи 2006: проектирование, строительство, опыт эксплуатации и научно-технический прогресс". — Новосибирск, 2006. — С. 310-320.
19. Яковлев Л.В., Каверина Р.С., Дубинич Л.А. Комплекс работ и предложений по повышению надежности ВЛ на стадии проектирования и эксплуатации // Материалы Третьей Российской с международным участием научно-практической конференции "Линии электропередачи 2008: проектирование, строительство, опыт эксплуатации и научно-технический прогресс". — Новосибирск, 2008. — С. 28-49.
 20. Ржевский С.С. Уроки системной аварии из-за пляски проводов на ВЛ 400-500 кВ // Электро. — М., 2006. — №6. — С. 9-15.
 21. Виноградов А.А. Современные подходы к гашению пляски проводов воздушных ЛЭП с одиночными и расщепленными фазами. Типы гасителей пляски, их сравнительная эффективность и эксплуатационная надежность. — М.: ЗАО ЭСПП.
 22. Горохов Е.В., Назим Я.В., Васильев В.Н., Лещенко А.А. Прогнозирование и предупреждение аварий на воздушных линиях электропередачи при действии экстремальных гололедно-ветровых нагрузок // Эффективность энергетического строительства и эксплуатации в Украине / Под ред. Е.В. Горохова и Г.И. Гримуда. — Макеевка: РИО ДонНАСА, 2008 — С. 54-65.
 23. Gorokhov Ye., Nazim Ya., Vasylev V., Kuznetsov S., Garkusheva V. Monitoring of Complex Design Systems of Special Structures // The 25th International Symposium on Automation and Robotics in Construction. ISARC-2008. Selected papers (June 26-29, 2008, Vilnius, Lithuania). Vilnius: Technika, 2008, P. 306-311.
 24. Overhead lines — Meteorological data for assessing climatic loads // IEC 61774. — Tr. 2. Ed. 1. —2000. — 76 p.

Горохов Євген Васильович — ректор Донбаської національної академії будівництва і архітектури, завідувач кафедри "Металеві конструкції", президент Української асоціації з металевих конструкцій, іноземний член Російської академії будівництва, академік Академії вищої школи та Академії будівництва України. Член Міжнародного комітету з вивчення дії вітру на будівлі та споруди. Наукові інтереси: експлуатаційна надійність і довговічність будівельних металевих конструкцій, кліматичні навантаження на будівельні конструкції.

Бакаєв Сергій Миколайович — доцент кафедри "Металеві конструкції" Донбаської національної академії будівництва і архітектури, секретар Донецького відділення Академії Будівництва України. Наукові інтереси: забезпечення надійної роботи та довговічності конструкцій опор повітряних ліній, порталів та стійок під обладнання відкритих розподільчих пристроїв електричних підстанцій в умовах підвищення потужностей енергоспоживання та з врахуванням умов та відмінностей їх експлуатації, проектування конструкцій з гарантованими показниками довговічності.

Назім Ярослав Вікторович — доцент кафедри "Металеві конструкції" Донбаської національної академії будівництва і архітектури, член Української асоціації з металевих конструкцій. Наукові інтереси: експлуатаційна надійність і довговічність електромережних конструкцій, динамічні навантаження на будівельні конструкції електромереж, особливості вітрових і ожеледних впливів на повітряні лінії електропередавання.

Моргай Вадим Валерієвич — інженер СНПЦ конструкцій електрмережевого будівництва Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: забезпечення надійної роботи та довговічності конструкцій опор повітряних ліній, порталів та стійок під обладнання відкритих розподільчих пристроїв електричних підстанцій в умовах підвищення потужностей енергоспоживання та з врахуванням умов та відмінностей їх експлуатації, проектування конструкцій з гарантованими показниками довговічності.

Попов Максим Сергійович — дипломник кафедри "Металеві конструкції" Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: проектування конструкцій з гарантованими показниками довговічності.

Горохов Евгений Васильевич — ректор Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, заведующий кафедрой "Металлические конструкции", президент Украинской ассоциации по металлическим конструкциям, иностранный член Российской академии строительства, академик Академии высшей школы и Академии строительства Украины, член Международного комитета по изучению воздействия ветра на здания и сооружения. Научные интересы: эксплуатационная надежность и долговечность строительных металлических конструкций, климатические нагрузки на строительные конструкции.

Бакаев Сергей Николаевич — доцент кафедры "Металлические конструкции" Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, секретарь Донецкого отделения Академии строительства Украины. Научные интересы: обеспечение надежной работы и долговечности конструкций опор воздушных линий, порталов и стоек под оборудование открытых распределительных устройств электрических подстанций в условиях повышения мощностей энергопотребления и с учетом условий и различий их эксплуатации, проектирования конструкций с гарантированными показателями долговечности.

Назим Ярослав Викторович — доцент кафедры "Металлические конструкции" Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, член Украинской ассоциации по металлическим конструкциям. Научные интересы: эксплуатационная надежность и долговечность электросетевых конструкций, динамические нагрузки на строительные конструкции электросетей, особенности ветровых и гололедных воздействий на воздушные линии электропередачи.

Моргай Вадим Валериевич — инженер СНПЦ конструкций электросетевого строительства Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: обеспечение надежной работы и долговечности конструкций опор воздушных линий, порталов и стоек под оборудование открытых распределительных устройств электрических подстанций в условиях повышения мощностей энергопотребления и с учетом условий и различий их эксплуатации, проектирования конструкций с гарантированными показателями долговечности.

Попов Максим Сергеевич — дипломник кафедры "Металлические конструкции" Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: проектирование конструкций с гарантированными показателями долговечности.

Gorokhov Yevhen Vasylyovych — Rector of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Head of Metal Structures Department; President of the Ukrainian Association of Metal Structures; a Foreign Member of the Russian Academy of Civil Engineering, an academician of the Higher School Academy and the Academy of Civil Engineering of Ukraine; a Member of the International Committee in Wind Engineering. His research interests include operational reliability and longevity of building metal structures, climatic loads on buildings and structures.

Bakayev Sergii Mykolayovych — an Associate Professor of Metal Structures Department of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture; Secretary of the Donetsk branch of the Academy of Civil Engineering of Ukraine. Research interests: providing reliable and durable operation of power transmission tower structures, portals and equipment racks for open distribution devices of the electric power substations under higher energy and capacity conditions regarding conditions and differences in their operation, design of structures with a guaranteed performance durability.

Nazim Yaroslav Victorovich — an Associate Professor of Metal Structures Department of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture; a member of the Ukrainian Association of Metal Structures. His research interests include operational reliability and longevity of power supply structures, dynamic loads on overhead line structures, wind and ice loadings and influences on overhead power transmission lines.

Morgay Vadim Valeriyovych works as an engineer of the Department of designing electric grid construction of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Research interests: providing reliable and durable operation of power transmission tower structures, portals and equipment racks for open distribution devices of the electric power substations under higher energy and capacity conditions regarding conditions and differences in their operation, design of structures with a guaranteed performance durability.

Popov Maxim Sergiyovych is a Graduate Student of Metal Structures Department of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Research interests: design of structures with a guaranteed performance durability.