

О. М. ДОВГАЛЮК, Р. В. БОНДАРЕНКО, І. С. ЯКОВЕНКО, К. А. МИРОШНИК, В. О. ВИСОКИХ

МОДЕЛЮВАННЯ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ З КОМПЗИТНИМИ ОПОРАМИ ДЛЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ НАПРУГОЮ 35-330 КВ

На основі виконаного аналізу технічного стану обладнання електричних мереж ОЕС України, сучасних викликів щодо розвитку енергетичної галузі та наявних технологій передачі електричної енергії обґрунтована доцільність використання опор з композитних матеріалів при розвитку, реконструкції та проектуванні нових повітряних ліній електропередачі для електричних мереж різного класу напруги. Досліджено особливості експлуатації опор із композитних матеріалів в електричних мережах багатьох країн світу, на основі чого сформульовані перспективи використання таких опор для повітряних ліній електропередачі в Україні в умовах запровадженого лібералізованого ринку електричної енергії, а також вимоги щодо показників роботи електричних мереж із досліджуваними опорами з композитних матеріалів. Виконано аналіз основних характеристик та властивостей композитних матеріалів, які найчастіше використовуються для виготовлення опор в сучасних енергосистемах, а також порівняння фізико-механічних властивостей опор з різних матеріалів. Аналіз одержаних результатів підтверджує певні переваги опор з композитних матеріалів, які сприяють поширенню впровадження таких опор в енергосистему України. Для дослідження впливу типу композитного матеріалу та конструкції опор на показники режимів роботи електричних мереж був виконаний механічний розрахунок опор, який проводився методом граничних станів. З використанням одержаних результатів розроблені математичні моделі повітряних ліній електропередачі з композитними опорами для електричних мереж напругою 35-330 кВ, які враховують технічні характеристики елементів повітряних ліній електропередачі та умови роботи електричних мереж, а також дозволяють виконати прогнозування кількісних показників подальшої експлуатації досліджуваних електричних мереж.

Ключові слова: електрична мережа, повітряна лінія електропередачі, композитна опора, схема розташування проводів, деформація, механічне напруження, межа міцності, граничний стан, прогин.

О. Н. ДОВГАЛЮК, Р. В. БОНДАРЕНКО, И. С. ЯКОВЕНКО, К. А. МИРОШНИК, В. О. ВЫСОКИХ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С КОМПЗИТНЫМИ ОПОРАМИ ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 35-330 КВ

На основе выполненного анализа технического состояния оборудования электрических сетей ОЭС Украины, современных вызовов развития энергетической отрасли и имеющихся технологий передачи электрической энергии обоснована целесообразность использования опор из композитных материалов при развитии, реконструкции и проектировании новых воздушных линий электропередачи для электрических сетей разного класса напряжения. Исследованы особенности эксплуатации опор из композитных материалов в электрических сетях многих стран мира, на основе чего сформулированы перспективы использования таких опор для воздушных линий электропередачи в Украине в условиях введенного либерализованного рынка электрической энергии, а также требования к показателям работы электрических сетей с исследуемыми опорами из композитных материалов. Выполнен анализ основных характеристик и свойств композитных материалов, которые чаще всего используются для изготовления опор в современных энергосистемах, а также сравнение физико-механических свойств опор из различных материалов. Анализ полученных результатов подтверждает определенные преимущества опор из композитных материалов, которые способствуют расширению внедрения таких опор в энергосистему Украины. Для исследования влияния типа композитного материала и конструкции опор на показатели режимов работы электрических сетей был выполнен механический расчет опор, который проводился методом предельных состояний. С использованием полученных результатов разработаны математические модели воздушных линий электропередачи с композитными опорами для электрических сетей напряжением 35-330 кВ, которые учитывают технические характеристики элементов воздушных линий электропередачи и условия работы электрических сетей, а также позволяют выполнить прогнозирование количественных показателей дальнейшей эксплуатации исследуемых электрических сетей.

Ключевые слова: электрическая сеть, воздушная линия электропередачи, композитная опора, схема расположения проводов, деформация, механическое напряжение, предел прочности, предельное состояние, прогиб.

О. М. DOVGALYUK, R. V. BONDARENKO, I. S. YAKOVENKO, K. A. MIROSHNYK, V. O. VYSOKYKH

MODELLING OF OVERHEAD TRANSMISSION LINES WITH COMPOSITE TOWERS FOR 35-330 KV ELECTRIC POWER NETWORKS

Based on the analysis of the technical condition of the equipment of the electric power networks of the UES of Ukraine, current challenges in the development of the energy sector and existing technologies for the transmission of electric energy, the expediency of using towers made of composite materials in the development, reconstruction and design of new overhead transmission lines for electric networks of different voltage classes is substantiated. The peculiarities of operation of towers made of composite materials in electric networks of many countries of the world are investigated, on the basis of which the prospects of using such towers for overhead transmission lines in Ukraine in the conditions of the introduced liberalised electricity market, as well as the requirements for the performance of electric power networks with the investigated towers made of composite materials are formulated. The article analyses the main characteristics and properties of composite materials that are most commonly used for the manufacture of towers in modern energy systems, as well as compares the physical and mechanical properties of towers made of different materials. The analysis of the obtained results confirms certain advantages of towers made of composite materials, which contribute to the widespread introduction of such towers in the Ukrainian energy system. To investigate the influence of the type of composite material and the design of the towers on the performance of electrical networks, a mechanical calculation of the towers was performed using the method of limit states. Using the obtained results, mathematical models of overhead transmission lines with composite towers for electric power networks with a voltage of 35-330 kV were developed, which take into account the technical characteristics of overhead transmission line elements and the operating conditions of electric power networks, and also allow forecasting quantitative indicators of further operation of the investigated electric power networks.

Keywords: electric power network, overhead transmission line, composite tower, wire layout, deformation, mechanical stress, tensile strength, limit state, deflection.

Постановка проблеми. Протягом останнього часу однією з тенденцій розвитку енергетики у світі є використання опор із композитних матеріалів (ОКМ), які мають ряд переваг у порівнянні з опорами з деревини металу та залізобетону. Так, їм властиві простота конструкції, кращі механічні характеристики, мала вага, високі діелектричні властивості, тривалий термін служби [1]. У зв'язку з цим сьогодні такі опори застосовуються в електричних мережах практично у будь-яких класах напруги – від мереж освітлення напругою 0,4 кВ до магістральних електричних мереж напругою 500 кВ.

Одними з перших застосовувати ОКМ почали енергетичні компанії США та Канади, де такі опори експлуатуються у складних кліматичних умовах, які утворюються через потужні пориви вітру, утворення значних ожеледео-паморозових відкладень тощо. За таких умов опори повітряних ліній електропередачі (ЛЕП) піддаються впливу значно більших навантажень, а значно вища еластичність композитного матеріалу порівняно із залізобетоном, металом та деревиною дозволяє їм витримувати тимчасові навантаження без пошкоджень та незворотних деформацій. На сьогоднішній день крім зазначених країн ОКМ успішно експлуатуються в Норвегії, Китаї, Польщі, Італії, Туреччині, Індії, Австралії та багатьох інших країнах. В Україні дані опори поки що застосовуються лише у розподільних електричних мережах, у той час як перспективи їх використання є вельми широкими та мають значні переваги в сучасних умовах запровадження лібералізованого ринку електроенергії.

Аналіз технічного стану електричних мереж України показує, що термін експлуатації значної частини опор повітряних ЛЕП перевищує 40 років [2], що свідчить про потребу реконструкції таких мереж для забезпечення необхідного рівня надійності електропостачання споживачів. В таких умовах доцільним є розгляд застосування ОКМ при розробці можливих варіантів для реконструкції електричних мереж. Слід зазначити, що обґрунтування доцільності застосування ОКМ вимагає детального вивчення всіх особливостей їх проектування, експлуатації та впливу даних опор як на навколишнє середовище, так і на режими роботи електричних мереж.

Для вирішення зазначених задач необхідно дослідити показники впливу та діапазони зміни параметрів режиму електричних мереж за умови застосування в них опор, які виконані з композитних матеріалів і мають особливості зміни властивостей за певних кліматичних умов оточуючого середовища. Оскільки натурні експерименти для вирішення цих задач будуть характеризуватись значним часом та великою вартістю, то найбільш результативним в цьому випадку є використання математичних моделей ОКМ, які дозволяють проводити аналіз потрібних показників стану досліджуваних опор та їх впливу на

характеристики роботи електричних мереж в реальних умовах експлуатації.

Таким чином, питання моделювання повітряних ЛЕП з ОКМ, що дає змогу дослідити показники режимів роботи електричних мереж з такими опорами, є важливим для аналізу умов подальшої їх експлуатації в досліджуваних електричних мережах та обґрунтування заходів щодо їх реконструкції і розвитку.

Аналіз публікацій. В останні роки вченими багато уваги приділяється вивченню питань, пов'язаних з визначенням можливих перспектив застосування ОКМ під час реконструкції електричних мереж, які значний час знаходяться в експлуатації, а також при проектуванні нових ЛЕП. Зокрема, велика кількість робіт присвячена питанням ефективності використання ОКМ в електричних мережах різних класів напруги [3, 4]. Так, авторами [3] запропоновано оптимальний варіант застосування ОКМ разом з дерев'яними для ЛЕП 10 кВ, що сприяє скороченню витрат на експлуатацію електричних мереж та значно збільшує термін експлуатації опор. У роботі [4] обґрунтовано, що використання ОКМ є більш економічним порівняно з дерев'яними опорами для повітряних ЛЕП в електричних мережах 132 кВ та дозволить заощаджувати значну кількість коштів при подальшій експлуатації мереж з такими опорами.

Багато досліджень присвячено вивченню ізоляційних властивостей композитних матеріалів та особливостей їх застосування для опор високовольтних ЛЕП [5], що може дозволити впроваджувати нові рішення щодо захисту ЛЕП від прямих ударів блискавки, у тому числі й простіші за традиційно та широко застосовувані на сьогодні. Такі методи ґрунтуються на збільшенні електричної міцності фазної ізоляції завдяки застосуванню композитного матеріалу для опор [6]. В роботі [7] було проведено дослідження різних методів заземлення ОКМ, а також виконано аналіз стійкості опор даного типу до дії ударів блискавки за різних параметрів грозової активності, за підсумками якого було визначено, що використання ОКМ сприяє збільшенню захищеності ЛЕП від впливу грозової активності.

Слід також відмітити важливість і велику практичну значущість досліджень, присвячених аналізу механічної міцності [8, 9] та динамічної поведінки ОКМ в різних умовах експлуатації [10, 11]. Суттєвими є дослідження щодо специфіки використання таких опор в енергосистемах різних країн, що характеризуються істотними відмінностями технічних, кліматичних та економічних умов функціонування електричних мереж [12, 13].

Для України питання використання ОКМ є не вирішеним остаточно до теперішнього часу, оскільки наразі не затверджено нормативних документів, які дозволяють проводити розрахунок та обґрунтовувати проектні рішення для повітряних ЛЕП з ОКМ. У той

же час використання таких опор в енергетичній системі України дає змогу отримати значний позитивний ефект завдяки зниженню витрат на обслуговування та ремонт електричних мереж, зниженню втрат, підвищенню грозостійкості та зменшенню габаритних розмірів ЛЕП. Ці перспективи набувають особливої актуальності в умовах запровадженого в Україні лібералізованого ринку електричної енергії та зазначених напрямків стратегічного розвитку енергосистеми для об'єднання на паралельну роботу з енергосистемою континентальної Європи ENTSO-E [14], для забезпечення яких необхідним є виконання вимог щодо показників роботи електричних мереж. У свою чергу, практична реалізація цих питань потребує обґрунтування, яке базується на кількісному порівнянні різних варіантів побудови електричних мереж та прогнозуванні відповідних особливостей їх подальшої експлуатації. Вирішення цієї задачі можливо за умови застосування математичного моделювання ЛЕП з врахуванням особливостей характеристик їх окремих елементів.

Світовий досвід експлуатації ОКМ. В багатьох країнах світу ОКМ знаходяться в експлуатації вже понад 10 років, що є достатнім для визначення основних особливостей їх застосування в різних умовах. Актуальність застосування ОКМ для повітряних ЛЕП визначається наступними факторами:

1. необхідність проведення реконструкції повітряних ЛЕП, особливо у важкодоступних місцях і віддалених районах з нерозвинутою мережею автомобільних доріг, де проїзд великовантажного транспорту стає проблематичним і доставка залізобетонних або сталевих опор пов'язана зі значними труднощами і витратами;

2. будівництво нових повітряних ЛЕП з гарантованим терміном експлуатації понад 50 років;

3. створення естетично привабливих локацій, які можливо використовувати при плануванні паркових зон, скверів, а також гармонійно застосувати в населених пунктах через їх ефектне поєднання з іншою міською архітектурою.

Аналіз світового досвіду використання ОКМ показує, що найчастіше використання таких опор відбувається в регіонах зі складними кліматичними і природними умовами експлуатації (сильні вітрові навантаження, велика ймовірність утворення ожеледо-паморозевих відкладень), а також у важкодоступній місцевості (при проходженні трас повітряних ЛЕП по гірським і болотистим територіям, лісовим масивам).

В електричних мережах США ОКМ успішно експлуатуються з 2000-х років переважно в регіонах із складними кліматичними умовами і за цей час вони неодноразово довели свої переваги під час випробування в екстремальних погодних катаклізмах. Так, у штаті Західний Кентуккі у 2008 р. пройшов сильний ураган "Айк" з поривами вітру до 40 м/с, під час якого понад 120 дерев'яних опор ЛЕП зазнали руйнування, внаслідок чого система електропостачання на декілька діб вийшла з ладу. Лише ОКМ залишилися без руйнувань. У 2009 р.

територією США пройшов масштабний крижаний шторм, під час якого понад 1600 дерев'яних опор ЛЕП зазнали руйнування під товстим шаром криги, внаслідок чого Кентуккі на 5 діб залишився без електрики, а на повну ліквідацію проблем у фахівців пішло понад 20 днів. Тільки ОКМ, які застосовувала компанія WKRECC, залишилися неушкодженими в таких погодних умовах.

У Норвегії виготовлені канадською компанією легкі склопластикові опори RStandard спочатку були встановлені під час реконструкції лише 2 км ділянки повітряної ЛЕП 132 кВ. За результатами їх експлуатації були зроблені висновки щодо високої ефективності використання таких опор і розглянута можливість їх застосування у важкодоступній гірській місцевості з суворими кліматичними умовами. Оскільки електричні мережі в Норвегії часто перетинають складну місцевість (переважно гірські райони без під'їзних доріг), це спонукає до широкого використання гелікоптерів для транспортування матеріалів і зведення опор під час будівництва ЛЕП. Досить гарним рішенням за таких умов стало використання саме ОКМ для різних класів напруги. Норвезька компанія Statnett згодом почала власну розробку концептуально нових конструкцій опор із скловолокна для ЛЕП в системі електропередачі 420 кВ [15].

Значний досвід використання ОКМ для ЛЕП низької та середньої напруги має Австралія та частина європейських країн (Італія, Великобританія та Польща), які вже проводять заміну старих дерев'яних опор на композитні для розподільчих мереж, особливо на ділянках, що проходять біля доріг та в міській місцевості [16]. В Китаї в даний час склопластик широко використовується в конструкції гратчастих і однополюсних опор для ЛЕП 220 кВ і нижче, а також для окремих елементів опор на більш високі класи напруги [17, 18]. Крім того ОКМ успішно експлуатують у Туреччині, Індії та багатьох інших країнах [19, 20]. При цьому композитні полімерні матеріали, армовані склопластиком, широко застосовуються в якості поперечних конструкцій в гратчастих опорах ЛЕП. Вдосконалення цих композитних конструкцій забезпечує чудові експлуатаційні характеристики від механічних навантажень завдяки кращій жорсткості, кращій поведінці при згинанні, покращеному поглинанню енергії та збільшеній несучій здатності.

В Україні ОКМ поки що застосовують тільки в розподільчих електричних мережах. Виготовленням і монтажем ОКМ займаються декілька компаній, серед яких ТОВ «МІКО» (м. Харків), що поставляє виготовлені у Туреччині на інтегрованому заводі ASAŞ Aluminium конічні ОКМ для електричних мереж різного класу напруги, в тому числі паркові й декоративні, опори освітлення, а також опори з внутрішнім RGB-підсвічуванням [21]. Компанія «STOLB» (м. Київ) займається створенням вуличного і паркового освітлення із застосуванням композитних паркових опор освітлення [22], компанія «Алютал» веде діяльність у Києві, Львові, Дніпрі, де займається виготовленням та монтажем опор для розподільчих

електричних мереж, серед яких значна кількість є композитними [23].

Враховуючи досвід експлуатації ОКМ в електричних мережах багатьох країн світу, а також умови розвитку енергетичного сектору України, можна стверджувати, що перспективи використання ОКМ є доволі широкими і привабливими для енергетики нашої держави. До них слід віднести наступні:

1. електричні мережі, траси яких розташовані на узбережжі Чорного та Азовського морів, для яких використання ОКМ сприятиме збільшенню терміну експлуатації в умовах з підвищеною вологістю та зниженню витрат на обслуговування таких мереж;

2. застосування ОКМ для промислових електричних мережах, які розташовуються в агресивному середовищі через особливості технологічного процесу, сприятиме збереженню властивостей і тривалого терміну експлуатації опор через їх стійкість до впливу шкідливого оточуючого середовища;

3. доцільним є використання ОКМ для ЛЕП, що розташовані в районах з потужними вітровими навантаженнями і значними показниками утворення ожеледо-паморозевих відкладень, де під час експлуатації ЛЕП піддаються значним тяжинням та навантаженням;

4. для спорудження або реконструкції ЛЕП, розташованих у важкодоступних місцях, як то гірська і заболочена місцевість, територія із ускладненими умовами для проїзду великовантажного транспорту;

5. створення естетичних локацій на території населених пунктів.

Слід зазначити, що при впровадженні ОКМ важливим є забезпечення всіх вимог щодо роботи електричних мереж на рівні світових показників. В першу чергу це стосується всіх параметрів мережі та режиму, а також показників надійності та якості надання послуг з електропостачання відповідно до вимог [24]. За таких умов дієвим інструментом для розробки та обґрунтування проектів з впровадження ОКМ стає математичне моделювання для досконалого аналізу умов їх подальшої експлуатації.

Аналіз характеристик і властивостей композитних матеріалів. ОКМ є новим типом опор, термін використання яких становить трохи більше 15 років, проте за цей час вони встигли зарекомендувати себе в якості пріоритетних конструкцій, що за певних умов експлуатації ЛЕП мають переваги через ряд незвичайних властивостей сучасних композитних матеріалів, які становлять певний інтерес з точки зору зниження витрат на монтаж та подальше обслуговування, а також значне підвищення експлуатаційної надійності електричних мереж.

Композитні матеріали є полімерними, їх властивості залежать від вибору вихідних компонентів та їх співвідношення, взаємодії між ними, методу і технологічних умов виготовлення виробу (тиску, температури, часу), додаткової обробки виробу і ряду інших чинників. Аналіз властивостей сучасних композитних матеріалів [25, 26] показує, що від ряду інших матеріалів їх відрізняють властивості, серед

яких найбільш важливими є наступні: невелика питома вага; високі показники механічної міцності; високі діелектричні показники; висока корозійна, хімічна і температурна стійкість; низька теплопровідність; стійкість до дії грибків, бактерій і комах; підвищена вологостійкість та морозостійкість; довговічність; легке виготовлення конструкцій будь-якої форми.

Завдяки своїм властивостям сучасні композитні матеріали здатні скласти конкуренцію деяким сталям і багатьом кольоровим металам, в тому числі й матеріалам, з яких традиційно виготовляють опори для повітряних ЛЕП. За статистикою використання на сьогоднішній день найбільш поширеним матеріалом для виробництва ОКМ для ЛЕП є склопластик, для якого в якості наповнювача застосовують скловолокно (кварцеве або скляне волокно), а в якості матриці – термопластичний полімер. Друге місце за використанням при виготовленні опор ЛЕП займає базальтопластик.

Для виготовлення ОКМ використовуються армовані полімерні композитні матеріали, з яких виконуються конструкції потрібної форми, переважно циліндричної або конічної, які збираються з окремих модулів. Застосовуватись вони можуть для електричних мереж на всі класи напруги. Такі опори не схильні до гниття та корозії, впливу птахів і комах, стійкі до дії хімічно агресивних середовищ і соляних розчинів, морозостійкі, мають високу вогнестійкість (можуть бути абсолютно негорючими при покритті декількома шарами вогнестійкого засобу). Отже, ОКМ не потребують технічного обслуговування в процесі експлуатації.

Результати порівняння деяких типових значень окремих властивостей композитних й інших матеріалів, що використовуються для виготовлення опор повітряних ЛЕП, наведені у табл. 1, аналіз даних якої показує, що важливою особливістю склопластику в порівнянні із сталевими та залізобетонними конструкціями опор є його еластичність та низька крихкість. Завдяки цьому ОКМ допускають значно більші вигини під впливом несиметричних навантажень, ніж сталеві та залізобетонні. Саме ця властивість ОКМ вказує на доцільність їх застосування в складних кліматичних умовах. Крім того, при виготовленні опор суттєвим фактором є можливість варіювання характеристик композитного матеріалу для забезпечення необхідних показників властивостей з врахуванням особливостей кліматичних умов їх подальшої експлуатації.

Отже, порівняння фізико-механічних властивостей опор з різних матеріалів підтверджує певні переваги ОКМ. Аналізуючи властивості композитних матеріалів та особливості подальшої експлуатації виготовлених з них опор повітряних ЛЕП, можна стверджувати, що за своїми фізико-механічними властивостями ОКМ мають ряд переваг порівняно до їх аналогів:

- мала вага опор у порівнянні з аналогічними за розмірами опорами з металу, деревини або залізобетону, що є особливо важливим при спорудженні ЛЕП у важкодоступних районах (гориста місцевість, болота);

Таблиця 1 – Порівняльні характеристики матеріалів для опор повітряних ЛЕП

Показник	Матеріал			
	Склопластик	Сталь	Залізобетон	Деревина
Густина, (кг/м ³)	1600-2000	7800	2500	550
Межа міцності при розтягуванні, МПа	1200-2500	410-560	50-300	103
Межа міцності при стисканні, МПа	800-1200	370-450	5-35	48
Межа міцності при згинанні, МПа	690-1240	180-240	5,2-70	86
Модуль пружності при розтягуванні, ГПа	50-70	210	20	10
Допустиме напруження при розтягуванні, МПа	410-800	100-400	0,1-0,7	7-10
Допустиме напруження при стисканні, МПа	410-800	100-400	1-9	10-12
Коефіцієнт лінійного теплового розширення, 10 ⁻⁶ С ⁻¹	5-14	11-14	12-15	3-5 вздовж волокон 7-10 впоперек волокон
Теплопровідність при 20 °С, Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹	0,3-0,5	46	1,5-2	2,72
Питомий об'ємно-електричний опір, Ом	1·1010	Провідник	Струмопровідна арматура	Провідник
Гігроскопічність, %	0,5	–	7-25	14-20
Довговічність, рік	понад 50 років (65-80)	30-40	20-25	20-30
Стійкість до дії хімічно агресивних середовищ і соляних розчинів	Стійкий	Не стійкий	Не стійкий	Не стійкий
Експлуатаційні витрати	Не потребує технічного обслуговування при експлуатації, регламентні роботи з обслуговування не рідше 1 раз на 10 років	Потребує регламентних робіт з обслуговування не рідше 1-2 разів на рік	Потребує регламентних робіт з обслуговування не рідше 1 разу на 6 років	Потребує регламентних робіт з обслуговування не рідше 1 разу на 3 роки

- спрощення зберігання і транспортування завдяки особливості конструкції опор, які складаються з порожнистих секцій, що дає можливість зберігати і перевозити їх одну в іншій;

- простота монтажу опор, яка полягає у відсутності застосування складних монтажних інструментів та важкої техніки для збору та встановлення ОКМ;

- висока швидкість і невелика вартість монтажу, знижені витрати на логістику;

- не потребують технічного обслуговування в процесі експлуатації, оскільки не схильні до гниття, корозії і містять мінімум сталевих елементів;

- потребують меншої площі постійного відводу землі під опори, що важливо для ЛЕП, розташованих на землях з високою вартістю оренди;

- мають високу міцність та довговічність;

- характеризуються екологічністю та високою вогнестійкістю, завдяки чому при використанні таких опор немає проблем з їх утилізацією, подібних до просиченої креозотом деревини;

- мають хороші діелектричні властивості, завдяки чому самі опори, виконані зі склопластику чи базальтопластику, є ізолятором в системі «провід – земля», що дозволяє спростити конструкцію всієї опори і відмовитися від застосування ізоляторів, замінивши їх ізоляційними траверсами, що також виконані з композитного матеріалу;

- підвищена стійкість до агресивних середовищ (корозії, ультрафіолетового випромінювання, температурних перевантажень, тощо);

- підвищена ударостійкість;

- відносна простота виготовлення конструкцій із сучасних композитних матеріалів, яка не вимагає великих фінансових вкладень в обладнання.

Зазначені переваги сприяють поширенню ОКМ в електричних мережах всіх класів напруги.

Математичне моделювання ОКМ. Для вирішення зазначеної задачі було виконано математичне моделювання стану проміжних та анкерних ОКМ з врахуванням власного тягіння опори та траверс ЛЕП, а також льодового та вітрового навантаження на її стійку та траверси, які враховувались як сили, що розподілені і прикладені вздовж всієї висоти опори. Загальне розподілення навантажень ОКМ для механічного розрахунку показано на рис. 1.

В різних умовах експлуатації значення навантажень будуть змінюватись в різних діапазонах залежно від сили вітру, які визначають величину горизонтальних розрахункових навантажень, а також конструктивних особливостей опори, які визначають величину вертикальних розрахункових навантажень. Під впливом дій цих навантажень опора зазнає деформації, що визначається прогином конструкції, який показано на рис. 2.

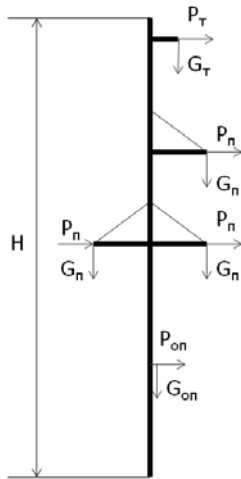


Рисунок 1 – Схема навантаження ОКМ: $P_T, P_n, P_{оп}$ – горизонтальні вітрові розрахункові навантаження на грозозахисний трос, проводи та опору;
 $G_T, G_n, G_{оп}$ – вертикальні навантаження від ваги грозозахисного тросу, проводів та опори, включаючи всі її елементи (фундаменти, траверси, гірлянди ізоляторів, проводи, троси, арматуру та все встановлене обладнання)

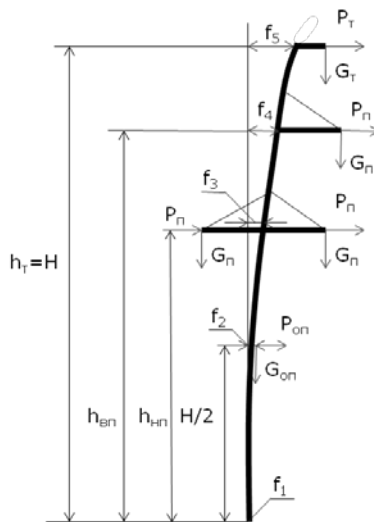


Рисунок 2 – Прогини під час деформації опори

Оскільки ОКМ мають високу пружність, в горизонтальній площині, величини прогинів f_i вздовж стійки опори будуть різні. Для врахування цієї властивості та одержання більш точного результату розрахунку висота стійки опори H при моделюванні була розбита на m ділянок, кожна з яких має висоту h_i та характеризується однаковою постійною жорсткістю E_j . Такий підхід до врахування особливості дії розподілених навантажень на стійку опори без спрощувальних припущень дозволяє отримати більш точний результат розрахунку пружних прогинів ОКМ.

Для визначення величини прогинів стійки ОКМ застосовуємо вираз:

$$f_i = \sum_{j=1}^m \frac{1}{E_j} \int \overline{M}_i(h) [M_0(h) + M(f_1, \dots, f_m, h)] dh, \quad (1)$$

де f_i – прогин на рівні верхньої межі i -ої ділянки стійки опори, $i = 1, \dots, m$;

$M_0(h)$ – момент від навантаження в недеформованому стані опори;

$M(f_1, \dots, f_m, h)$ – момент від вертикальних навантажень внаслідок деформації;

$\overline{M}_i(h)$ – згинальний момент від одиначної, горизонтальної сили, прикладеної лише на рівні h .

Величини діапазонів вильоту траверси опори при визначених прогинах в результаті деформації визначаються за виразом:

$$x_{f_i} = x_0 + \Delta x_{f_i}, \quad (2)$$

де x_{f_i} – величина вильоту траверси опори на рівні верхньої межі i -ої ділянки стійки опори;

x_0 – координата крайньої точки траверси в недеформованому стані опори;

Δx_{f_i} – координата крайньої точки траверси в деформованому стані, що призвів до прогину f_i стійки на рівні верхньої межі i -ої ділянки.

Розроблені математичні моделі дають змогу більш точно врахувати механічні властивості матеріалу опор та особливості їх експлуатації в реальних кліматичних умовах.

Аналіз механічних властивостей ОКМ. Для дослідження впливу конструкції та типу матеріалу опор на показники режимів роботи електричних мереж був виконаний механічний розрахунок опор, який проводився методом граничних станів. Для проведення дослідження були використані найбільш поширені типові конструкції ОКМ для повітряних ЛЕП, які застосовуються в електричних мережах різних класів напруги США, Канади, Китаю, Австралії та Туреччини [27]. Був виконаний аналіз і класифікація основних типів таких опор, серед яких виділені найбільш перспективні для застосування в Україні (рис. 3).

Для вибраних типів опор різної конструкції були виконані розрахунки механічних та технічних характеристик внаслідок деформацій від різних впливів, що є характерними для експлуатації повітряних ЛЕП. Приклад такого розрахунку для опори PRS на 110 кВ представлений на рис. 4.

З використанням одержаних значень механічних характеристик досліджуваних ОКМ був проведений розрахунок їх оптимальних габаритів та гранично допустимих відхилень під час деформацій в результаті різних впливів при експлуатації повітряних ЛЕП. Для вирішення цієї задачі з використанням запропонованих виразів (1) і (2) були одержані значення прогинів стійок опор для електричних мереж різної номінальної напруги, які дозволяють визначити габарити повітряних ЛЕП та гранично допустимі відхилення. Результати розрахунку представлені в табл. 2.

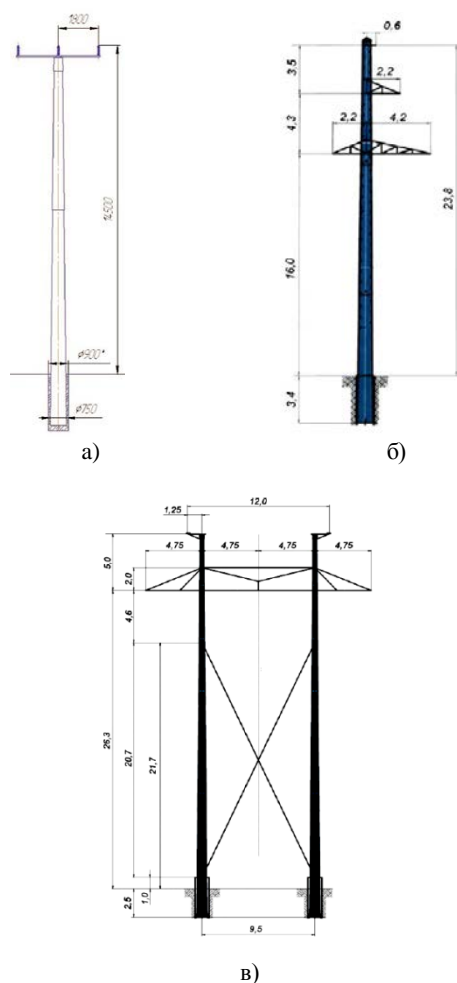


Рисунок 3 – Опори, виготовлені з композитних матеріалів:
а) опора типу ПК-35; б) опора типу PIRS 110-1.170-275-071;
в) опора типу PPRS 330-1.263-338-0309

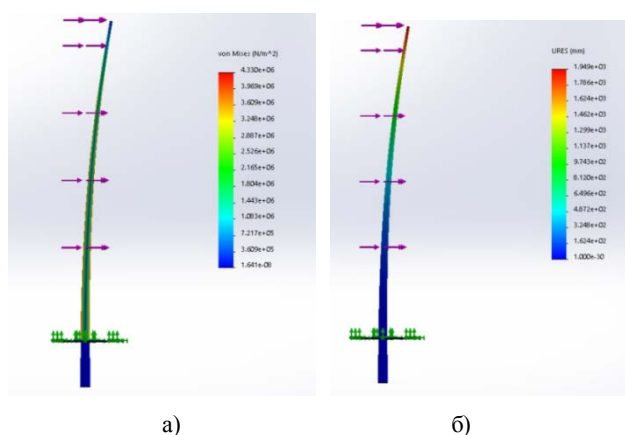


Рисунок 4 – Результати розрахунку механічних характеристик для опори PIRS 110-1.170-275-071:
а) епюра напруг; б) епюра деформацій опори

Розрахунок проводився відповідно до умов вітрового навантаження та утворення ожеледо-паморозевих відкладень для Харківської області відповідно [28]:

- значення вітрового тиску відповідають 3 кліматичному району, для якого значення максимального вітрового тиску становить 500 Па;

- значення утворення ожеледо-паморозевих відкладень відповідають 2 кліматичному району, для якого при визначається лінійне навантаження ожеледо-паморозевих відкладень, середня вага яких дорівнює 12 Н/м, а стінка ожеледі становить 16 мм.

Таблиця 2 – Прогини стійок ОКМ для досліджуваних електричних мереж 330, 110 і 35 кВ

Номинальна напруга електричної мережі	Величина прогину стійки опори, м		
	на рівні грозозахистного тросу f_5	на рівні верхньої траверси f_4	на рівні нижньої траверси f_3
330 кВ	3,07	2,85	1,73
110 кВ	2,35	2,18	1,32
35 кВ	1,41	1,32	0,81

Аналіз даних табл. 2 показує, що максимальна величина прогину стійки, що спостерігається у верхній точці ОКМ, становить 10-12 % від висоти опори. Це на 30 % менше від граничного стану опори за умовами руйнування.

Подальший розрахунок положення проводів, тросів в прогони мають бути уточнені відповідно до одержаних значень прогинів стійок опор. Отже, розроблені математичні моделі дають змогу більш точно врахувати механічні властивості матеріалу опор та особливості їх експлуатації в реальних кліматичних умовах.

Результати розрахунку повністю підтверджують, що у порівнянні із залізобетонними та металевими опорами досліджувані ОКМ мають кращі механічні характеристики, більш високу гнучкість до руйнування або залишкової деформації, а також більші значення відхилень для стійок та траверс, що значно впливає на ширину коридору повітряної ЛЕП та потребує врахування в нормативних проектних документах. Крім того, за умови дотримання ізоляційних відстаней між проводами використання ОКМ дозволяє змінювати параметри ЛЕП, що дозволить знизити втрати в електричних мережах.

Висновки. Виконаний аналіз світового досвіду експлуатації ОКМ показав, що використання таких опор у важкодоступній місцевості та для регіонів із складними кліматичними та природними умовами цілком себе виправдовує і дає гарні результати за показниками механічної міцності опор та надійності роботи електричних мереж. Беручи до уваги цей досвід та технічний стан обладнання електричних мереж ОЕС України, обґрунтовано доцільність та гарні перспективи впровадження ОКМ для енергетики нашої країни під час розвитку, реконструкції та спорудження нових ЛЕП в електричних мережах 35-330 кВ.

Аналіз основних характеристик та властивостей композитних матеріалів, які використовуються для виготовлення опор, дозволив виконати порівняння фізико-механічних властивостей опор з різних матеріалів, а також виконати уточнене математичне моделювання стану проміжних та анкерних опор повітряних ЛЕП з врахуванням механічних

властивостей матеріалу опор, особливостей їх конструкції та реальних кліматичних умов експлуатації. Одержані результати моделювання підтверджують переваги ОКМ по відношенню до опор з металу, деревини та залізобетону за різних умов експлуатації, а також можуть бути застосовані для більш досконалого визначення показників впровадження таких опор в електричні мережі.

Список літератури

- Sarmento M., Lacoursiere B. A. State of the Art Overview Composite Utility Poles for Distribution and Transmission Applications. *Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America*. Caracas, Venezuela. 2006. P. 1–4.
- Національна енергетична компанія «Укренерго», Електричні мережі Укренерго. URL: <https://ua.energy/about/merezhi-ukrenergo/> (дата звернення 03.11.2021).
- Fursanov M. I., Sazonov P. A. Analysis of the Efficiency of Composite Supports in Electric Networks of the Republic of Belarus. *Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*. 2019. Vol. 62, no. 1. P. 15–23.
- Tonne E., Dale V., Foosnes J. A. Experiences from a test project in Norway using composite poles in 132 kV overhead lines. *22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013)*. Stockholm, Sweden. 2013. P. 1–4. doi: 10.1049/cp.2013.1216.
- Kumosa M., Armentrout D., Burks B., Hoffman J., Kumosa L., Middleton J., Predecki P. Polymer matrix composites in high voltage transmission line applications. *18th International Conference on Composite Materials*. Jeju Island, Korea. 2011. P. 1–6.
- Zhijun L., Han-Ming L., Min D., Shi-Cong D., Ding-xie G., Qian-Hu W. Study on grounding design for lightning of tubular composite material towers in 110 kV overhead transmission line. *2010 International Conference on High Voltage Engineering and Application*. New Orleans, USA. 2010. P. 473–475, doi: 10.1109/ICHVE.2010.5640725.
- Hu C. et al. Investigation on 110kV composite material pole: Effects of grounding methods on insulation of conductor-pole gaps. *2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*. Chengdu, China. 2016. P. 1–5, doi: 10.1109/ICHVE.2016.7800782.
- Mohd Zainuddin N. et al. Review of Thermal Stress and Condition Monitoring Technologies for Overhead Transmission Lines: Issues and Challenges. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 120053–120081, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3004578.
- Arhat R., Puzyr R., Kulynych V., Sira Y., Shchetynin V., Vorobyov V., Research of the Stress State While Obtaining Tapered Flares on the Connecting Elements of Electrical Wires. *2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. Kremenichuk, Ukraine. 2021. P. 1–6, doi: 10.1109/MEES52427.2021.9598606.
- Bhowmik C., Chakraborti P., Das S. S., Singh R. Modal Analysis of 132 kV Double Circuit Electric Power Transmission Tower Made up with Composite Material Thermoplastic Long Carbon Fiber Nylon 66. P. 891–899. In book: Kumar M. et al. *Advances in Interdisciplinary Engineering*. Advances in Interdisciplinary Engineering, Lecture Notes in Mechanical Engineering, doi: 10.1007/978-981-13-6577-5_86.
- Vasconcelos G. C. et al. Creep and Aging Evaluation of Phenol-Formaldehyde Carbon Fiber Composites in Overhead Transmission Lines. *Applied Composite Materials*. 2021. Vol. 28, P. 1697–1714, doi: 10.1007/s10443-021-09935-6.
- Dovgalyuk O., Bondarenko R., Yakovenko I., Dyakov E., Syromyatnikova T. Rationale for the introduction of composite supports in Ukrainian electricity networks. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. Kharkiv, Ukraine. 2021. P. 705–708, doi: 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570076.
- Bhowmik E. C., Gupta K., Chakraborti P. Stability analysis of Glass Fiber Polyamide Composite Transmission Tower. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2020. P. 1–14, doi: 10.1177/0731684420937357.
- Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність». Схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 18.08.2017 р. № 605-р. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-%D1%80> (дата звернення 03.11.2021).
- Statnett. Composite and aluminium towers. URL: <https://www.statnett.no/en/about-statnett/innovation-and-technology-development/our-prioritised-projects/composite-and-aluminium-towers/> (дата звернення 05.11.2021).
- Mohammed A. A., Manalo A. C., Ferdous W., Zhuge Y., Vijay P.V., Alkinani A.Q., Fam A. State-of-the-art of prefabricated FRP composite jackets for structural repair. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2020. Vol. 23, Iss. 5. P. 1244–1258.
- Hu Y., Liu T. Experimental research on performance of composite materials pole of 110 kV transmission line. *Voltage Engineering*. 2011. Vol. 37 (4). P. 801–807.
- An L., Wu J., Zhang Z., Zhang R. Failure analysis of a lattice transmission tower collapse due to the super typhoon Rammasun in July 2014 in Hainan Province, China. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn*. 2018. Vol. 182. P. 295–307.
- Zhu Y., Wang L., Yu J., Fang J. Optimal insulation design for new-type transmission tower with composite cross-arm. In *Proceedings of the International Symposium on Electrical Insulating Materials*. 2017. Vol. 2. P. 578–581.
- Abd Rahman M. S., Ab Kadir M. Z. A., Ab-Rahman M. S., Osman M., Mohd Nor S. F., Mohd Zainuddin N. Effects of a Crossarm Brace Application on a 275 kV Fiberglass-Reinforced Polymer Crossarm Subjected to a Lightning Impulse. *Energies*. 2020. Vol. 13. P. 6248.
- Компанія МКО. Опори освітлення, енергетичні опори, світильники, енергетична арматура. URL: <https://miko.ua/> (дата звернення 03.11.2021).
- Компанія STOLB. Композитні опори вуличного освітлення. URL: <https://stolb.com.ua/> (дата звернення 03.11.2021).
- Компанія Alutal. Композитні опори. URL: <https://www.alutal.com.ua/> (дата звернення 03.11.2021).
- Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП). Офіційний веб-сайт. URL: <http://www.nerc.gov.ua/?id=11895> (дата звернення 03.11.2021).
- Pleša I., Nottingher P. V., Schlögl S., Sumereder C., Muhr M. Properties of Polymer Composites Used in High-Voltage Applications. *Polymers (Basel)*. 2016. Vol. 8(5), no. 173. P. 1–63, doi: 10.3390/polym8050173.
- Czapla A., Ganesapillai M., Drewnowski J. Composite as a Material of the Future in the Era of Green Deal Implementation Strategies. *Processes*. 2021. Vol. 9(12). P. 2238, doi: 10.3390/pr9122238.
- Dovgalyuk O., Bondarenko R., Miroshnyk K., Yakovenko I., Dyakov E., Syromyatnikova T. Features Analysis of Composite Supports Application for Electric Power Networks in Ukraine. *2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. Kharkiv, Ukraine. 2020. P. 103–108, doi: 10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250150.
- Правила улаштування електроустановок*. Київ: Міненерговугілля України, 2017. 617 с.

References (transliterated)

- Sarmento M., Lacoursiere B. A. State of the Art Overview Composite Utility Poles for Distribution and Transmission Applications. *Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America*. Caracas, Venezuela. 2006. P. 1–4.
- Natsionalna enerhetychna kompaniia «Ukrenerho», Elektrychni merezhi Ukrenerho. URL: <https://ua.energy/about/merezhi-ukrenergo/> (data zvernennia 03.11.2021).
- Fursanov M. I., Sazonov P. A. Analysis of the Efficiency of Composite Supports in Electric Networks of the Republic of Belarus. *Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*. 2019. Vol. 62, no. 1. P. 15–23.
- Tonne E., Dale V., Foosnes J. A. Experiences from a test project in Norway using composite poles in 132 kV overhead lines. *22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013)*. Stockholm, Sweden. 2013. P. 1–4. doi: 10.1049/cp.2013.1216.
- Kumosa M., Armentrout D., Burks B., Hoffman J., Kumosa L., Middleton J., Predecki P. Polymer matrix composites in high voltage

- transmission line applications. *18th International Conference on Composite Materials*. Jeju Island, Korea. 2011. P. 1–6.
6. Zhijun L., Han-Ming L., Min D., Shi-Cong D., Ding-xie G., Qian-Hu W. Study on grounding design for lightning of tubular composite material towers in 110 kV overhead transmission line. *2010 International Conference on High Voltage Engineering and Application*. New Orleans, USA. 2010. P. 473–475, doi: 10.1109/ICHVE.2010.5640725.
 7. Hu C. et al. Investigation on 110kV composite material pole: Effects of grounding methods on insulation of conductor-pole gaps. *2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*. Chengdu, China. 2016. P. 1–5, doi: 10.1109/ICHVE.2016.7800782.
 8. Mohd Zainuddin N. et al. Review of Thermal Stress and Condition Monitoring Technologies for Overhead Transmission Lines: Issues and Challenges. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 120053–120081, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3004578.
 9. Arhat R., Puzyr R., Kulynych V., Sira Y., Shchetynin V., Vorobyov V., Research of the Stress State While Obtaining Tapered Flares on the Connecting Elements of Electrical Wires. *2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. Kremenchuk, Ukraine. 2021. P. 1–6, doi: 10.1109/MEES52427.2021.9598606.
 10. Bhowmik C., Chakraborti P., Das S. S., Singh R. *Modal Analysis of 132 kV Double Circuit Electric Power Transmission Tower Made up with Composite Material Thermoplastic Long Carbon Fiber Nylon 66*. P. 891–899. In book: Kumar M. et al. *Advances in Interdisciplinary Engineering*. Advances in Interdisciplinary Engineering, Lecture Notes in Mechanical Engineering, doi: 10.1007/978-981-13-6577-5_86.
 11. Vasconcelos G. C. et al. Creep and Aging Evaluation of Phenol-Formaldehyde Carbon Fiber Composites in Overhead Transmission Lines. *Applied Composite Materials*. 2021. Vol. 28, P. 1697–1714, doi: 10.1007/s10443-021-09935-6.
 12. Dovgalyuk O., Bondarenko R., Yakovenko I., Dyakov E., Syromyatnikova T. Rationale for the introduction of composite supports in Ukrainian electricity networks. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. Kharkiv, Ukraine. 2021. P. 705–708, doi: 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570076.
 13. Bhowmik E. C., Gupta K., Chakraborti P. Stability analysis of Glass Fiber Polyamide Composite Transmission Tower. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2020. P. 1–14, doi: 10.1177/0731684420937357.
 14. Enerhetychna stratehiia Ukrainy na period do 2035 roku «Bezpeka, enerhoefektyvnist, konkurentospromozhnist». Skhvaleno rozporiadzhenniam Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 18.08.2017 r. № 605-r. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-%D1%80> (data zvernennia 03.11.2021).
 15. Statnett. Composite and aluminium towers. URL: <https://www.statnett.no/en/about-statnett/innovation-and-technology-development/our-prioritised-projects/composite-and-aluminium-towers/> (data zvernennia 05.11.2021).
 16. Mohammed A. A., Manalo A. C., Ferdous W., Zhuge Y., Vijay P.V., Alkinani A.Q., Fam A. State-of-the-art of prefabricated FRP composite jackets for structural repair. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2020. Vol. 23, Iss. 5. P. 1244–1258.
 17. Hu Y., Liu T. Experimental research on performance of composite materials pole of 110 kV transmission line. *Voltage Engineering*. 2011. Vol. 37 (4). P. 801–807.
 18. An L., Wu J., Zhang Z., Zhang R. Failure analysis of a lattice transmission tower collapse due to the super typhoon Rammasun in July 2014 in Hainan Province, China. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 2018. Vol. 182. P. 295–307.
 19. Zhu Y., Wang L., Yu J., Fang J. Optimal insulation design for new-type transmission tower with composite cross-arm. In *Proceedings of the International Symposium on Electrical Insulating Materials*. 2017. Vol. 2. P. 578–581.
 20. Abd Rahman M. S., Ab Kadir M. Z. A., Ab-Rahman M. S., Osman M., Mohd Nor S. F., Mohd Zainuddin N. Effects of a Crossarm Brace Application on a 275 kV Fiberglass-Reinforced Polymer Crossarm Subjected to a Lightning Impulse. *Energies*. 2020. Vol. 13. P. 6248.
 21. Kompaniia MIKO. Opory osvittlenia, enerhetychni opory, svitylnyky, enerhetychna armatura. URL: <https://miko.ua/> (data zvernennia 03.11.2021).
 22. Kompaniia STOLB. Kompozytni opory vulychnoho osvittlenia. URL: <https://stolb.com.ua/> (data zvernennia 03.11.2021).
 23. Kompaniia Alutal. Kompozytni opory. URL: <https://www.alutal.com.ua/> (data zvernennia 03.11.2021).
 24. Natsionalna komisiia, shcho zdiisniuie derzhavne rehuliuвання u sferakh enerhetyky ta komunalnykh posluh (NKREKP). Ofitsiinyi veb-sait. URL: <http://www.nerc.gov.ua/?id=11895> (data zvernennia 03.11.2021).
 25. Pleša I., Nožingher P. V., Schlögl S., Sumereder C., Muhr M. Properties of Polymer Composites Used in High-Voltage Applications. *Polymers (Basel)*. 2016. Vol. 8(5), no. 173. P. 1–63, doi: 10.3390/polym8050173.
 26. Czaplá A., Ganesapillai M., Drewnowski J. Composite as a Material of the Future in the Era of Green Deal Implementation Strategies. *Processes*. 2021. Vol. 9(12). P. 2238, doi: 10.3390/pr9122238.
 27. Dovgalyuk O., Bondarenko R., Miroshnyk K., Yakovenko I., Dyakov E., Syromyatnikova T. Features Analysis of Composite Supports Application for Electric Power Networks in Ukraine. *2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. Kharkiv, Ukraine. 2020. P. 103–108, doi: 10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250150.
 28. *Pravyly ulashtuvannia elektroustanovok. Kyiv: Minenerhovuhillia Ukrainy, 2017. 617 s.*

Надійшла (received) 18.11.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Довгалюк Оксана Миколаївна (Довгалюк Оксана Николаевна, Dovgalyuk Oksana Mykolayivna) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри передачі електричної енергії; Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1994-619X>; e-mail: Oksana.Dovhaliuk@kphi.edu.ua.

Бондаренко Роман Вікторович (Бондаренко Роман Викторович, Bondarenko Roman Viktorovich) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри передачі електричної енергії; Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6081-5020>; e-mail: elektrotehnika245@ukr.net.

Яковенко Іван Сергійович (Яковенко Иван Сергеевич, Yakovenko Ivan Serhiyovych) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри передачі електричної енергії; Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9934-2841>; e-mail: i.c.jakovenko@gmail.com.

Мірошник Костянтин Артурович (Мірошник Константин Артурович, Miroshnyk Kostiantyn Arturovych) – аспірант кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна; e-mail: Kostiantyn.Miroshnyk@ieee.kphi.edu.ua.

Високих Владислав Олегович (Високих Владислав Олегович, Vysokykh Vladyslav Olegovich) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент кафедри передачі електричної енергії; Харків, Україна; e-mail: vladyslav.vysokykh@ieee.kphi.edu.ua.