

# ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

УДК 621.315.1

В.О. Бржезицький, д-р техн. наук, проф., В.М. Сулейманов, канд. техн. наук, проф.,  
Є.О. Троценко, канд. техн. наук, доц., В.І. Хомініч, канд. техн. наук, доц., А.Г. Кулакевич, магістрант  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ ПОВІТРЯНОЇ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ ЗМІННОГО СТРУМУ КЛАСУ 330 кВ

*Наведено експериментальні значення напруженості електричного поля на висоті 1,8 м від поверхні землі в зоні електромагнітного впливу високовольтної повітряної лінії класу 330 кВ на проміжному прогоні довжиною 400 м між двома опорами типу ППОД-8 (П330-9) з підвісними гірляндами (19 підвісних лінійних ізоляторів типу ПС-120), розщепленою фазою (2хАС 330/39) з кроком розщеплення 0,4 м. Як засіб діагностики використаний прилад ВНЕП-50 з діапазоном вимірювання 0,5...48 кВ/м. Межі припустимої основної зведеної похибки на основному діапазоні вимірювання (від 3 до 48 кВ/м) - не більше  $\pm 10$ , на додатковому діапазоні (від 2 до 0,5 кВ/м) - не більше  $\pm 20\%$ . Проведено порівняння одержаних значень напруженості з розрахунковими та нормативними даними. Визначено напрямок подальших досліджень.*

**Ключові слова:** напруженість електричного поля, високовольтні повітряні лінії електропередавання, екологічний вплив, санітарно-захисні та охоронні зони, гранично допустимі норми напруженості, прилад ВНЕП-50

**Вступ.** Необхідність здійснення більш ефективного постачання електроенергії під час прогресивного зростання її споживання у світі гостро ставить проблему збільшення пропускну здатності високовольтних повітряних ліній електропередавання (ПЛ). При цьому виникає вимога оптимізації величин зон відчуження ПЛ, яка є особливо критичною при необхідності глибокого вводу високої напруги у великі міста та перетині трасою ПЛ населених пунктів і земель промислового призначення [1]. Одним з основних обмежуючих факторів високовольтного електропередавання є екологічний вплив ПЛ, оскільки електричні установки високої напруги є джерелами потужного електромагнітного випромінювання, що негативно впливає на довкілля та життєдіяльність людини.

Оскільки магнітна складова електромагнітного поля ПЛ при частоті 50 Гц на нормованій відстані від землі, що дорівнює 1,8 м, суттєво не впливає на життєдіяльність людини, за основний параметр дії електромагнітного випромінювання частотою 50 Гц на здоров'я людини в Україні нормативно прийнято напруженість електричного поля, за величиною якої визначено її гранично допустимі рівні (ГДР) та час перебування людини у зонах впливу при різних її значеннях [2, 3]. Відповідно до ГДР введено поняття санітарно-захисної зони (території на висоті 1,8 м від поверхні землі, в межах якої напруженість електричного поля перевищує 1 кВ/м), та охоронної зони (земельної ділянки, яка обмежує мінімально допустимі відстані від джерел випромінювання - високовольтних електроустановок [4-6]).

Аналітичним та чисельним розрахункам величин напруженості електричних полів частотою 50 Гц в зонах дії ПЛ різними методами присвячено значний обсяг наукових публікацій [7, 8]. При цьому слід відзначити, що критерієм достовірності одержаних в різних роботах результатів можуть слугувати тільки експериментальні значення, одержані в результаті прямого фізичного вимірювання напруженості електричного поля у зоні впливу ПЛ.

**Мета та завдання.** Метою роботи є експериментальне визначення значень напруженості електричного поля ПЛ класу 330 кВ у зоні її впливу, порівняльний аналіз експериментально одержаних та розрахункових значень напруженості електричного поля повздовж траси проходження ПЛ, а також визначення відповідності отриманих значень допустимим рівням, які встановлені в нормативних документах та уточнення існуючих методик розрахунку та вимірювань напруженості електричного поля під високовольтними лініями електропередавання з використанням результатів експериментальних досліджень.

**Матеріал та результати досліджень.** Для вимірювання напруженості електричного поля на висоті 1,8 м від поверхні землі вздовж траси проходження високовольтної ПЛ було обрано один типовий проміжний прогін ПЛ 330 кВ в Київській області, який згідно [6] відповідає 3 району по ожеледі (навантаження ожеледі 15 Н/м при товщині стінки ожеледі 19 мм) та 1 району по вітровому тиску (при його значенні 400 Па/м). Довжина прогону становить 400 м. На прогоні встановлені проміжні опори типу ППОД-8 (ПЗ30-9) (рис. 1, 2) на відтяжках з висотою до точки підвісу гірлянди 25,5 м. У підтримувальних гірляндах використано 19 ізоляторів типу ПС-120 (будівельна висота ізолятора дорівнює 127 мм). Довжина гірлянди для району розташування з другим ступенем забруднення атмосфери, відповідного трасі ПЛ, дорівнює 2,42 м. При цьому висота підвішування проводів від землі становить 23,1 м. У досліджуваній ПЛ використані сталеві алюмінієві проводи 2хАС 330/39 з кроком розщеплення 0,4 м та еквівалентним радіусом 0,0657 м. Міжфазна відстань дорівнює 8,2 м. Грунт під опорами – суглинок та супісок з питомим опором  $10^2 \dots 3 \cdot 10^2$  Ом·м. Поряд з ПЛ 330 відсутні інші ПЛ, тому результати вимірювань зумовлені тільки проводами цієї лінії та наземними об'єктами, які спотворюють електричне поле, а саме, низкою дерев висотою не більш за 14 м, які ростуть з одного боку ПЛ на відстані 8 м від проекції крайньої правої фази та поодинокими невисокими (висотою не більш за 2м) будівлями вздовж траси.

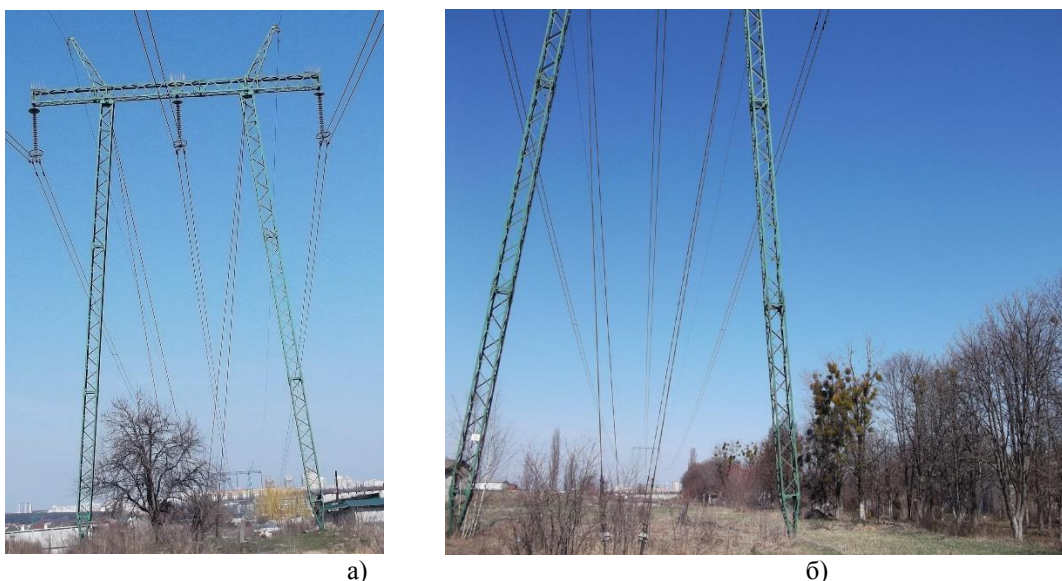


Рисунок 1 - Сталева одноланцюгова проміжна портална опора класу 330 кВ типу ППОД-8 (ПЗ30-9) на відтяжках з гірляндами ізоляторів типу ПС-120 а) фотознімок опори, б) ряд дерев та поодинокий об'єкт, розташовані з правого боку траси досліджуваної ПЛ

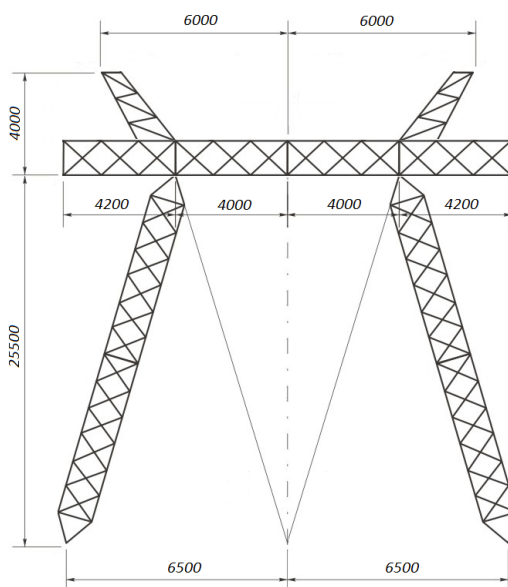


Рисунок 2 – Ескіз опори ППОД-8 (ПЗ30-9)

Дослідження проводилися при середній температурі повітря 20<sup>0</sup> С.

Як діагностичний засіб було використано атестований в Україні прилад ВНЕП-50 [9, 10] з трьохкомпонентним датчиком для вимірювання середньоквадратичного значення напруженості змінного електричного поля частотою (50±1) Гц. Значення напруженості, які вимірює прилад, не залежать від орієнтації останнього в досліджуваному електричному полі. Діапазон робочих температур приладу - від мінус 10 °С до плюс 40 °С. Прилад дає змогу визначати значення напруженості електричного поля в діапазоні 0,2...48 кВ/м при похибках її вимірювання 10 % у діапазоні 3...48 кВ/м та 20 % - у діапазоні 0,2...5 кВ/м. Для запобігання спотворення оператором вимірюваного електричного поля прилад встановлювали вертикально на ізолюючу штангу висотою 1,8 м, після чого оператор віддалявся від нього на відстань більш за 3 м. У процесі вимірювань проводили перевірку визначення імовірної залежності показань приладу від його просторової орієнтації. Зміни результатів вимірювань досліджуваного електричного поля при цьому не спостерігалося.

Результати досліджень електричного поля повздож половини прогону наведені на рис.3. На горизонтальній вісі крайній лівій фазі відповідає 0 м, середній фазі відповідає 8,2 м, крайній правій відповідає 16,4 м. Вимірювання проводилися під лінією на висоті 1,8 від поверхні землі до відстані 30 м з шагом 5 м від проекції крайньої фази на землю з лівого боку та 5 м від проекції крайньої фази на землю з правого боку.

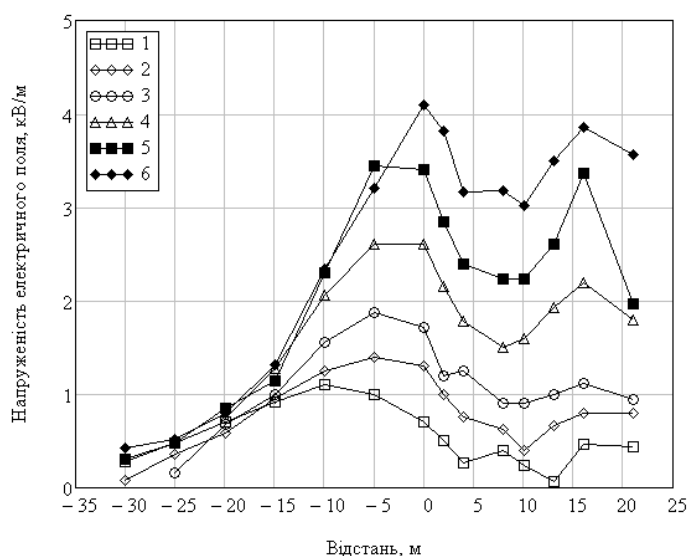


Рисунок 3 - Результати досліджень напруженості електричного поля в зоні впливу ПЛ 330 кВ на висоті 1,8 м від поверхні землі в залежності від відстаней від площини проекції фазного проводу лівої фази у перетині траси ПЛ при відстані від опори:

1 – 0 м; 2 – 20 м; 3 – 40 м; 4 – 100 м; 5 – 138 м; 6 – 200 м (середина прогону)

Криві на рисунку 3 відтворюють характерні особливості розподілення поля в прогоні ПЛ. Так, зі зростанням стріли провисання при віддаленні від опори напруженість електричного поля зростає від 1,2 кВ/м під опорою і досягає свого максимуму 4,1 кВ/м в середині прогону, де відстань між проводами і землею є мінімальною. Порушення симетрії розподілення поля відносно середньої фази і деяке зменшення напруженості поблизу правої з них можна пояснити по-перше, впливом дерев, що ростуть тільки з цього боку ПЛ, (вказане явище відповідає сучасним уявленням [11]), а по-друге - похибкою вимірювання приладом напруженості електричного поля біля сторонніх об'єктів.

Для аналізу та контролю експериментальних результатів вимірювань напруженості електричного поля приладом ВНЕП проводився аналітичний розрахунок їх значень. При цьому був обраний метод еквівалентних зарядів, який завдяки своїй відносній простоті та достатній точності [12-14] набув широкого поширення на практиці для розрахунку електричних полів ПЛ. За методом еквівалентних зарядів визначалася максимальна напруженість в середині прогону, тобто, де проводи максимально наближаються до землі та, окрім того, йдуть практично паралельно землі та один одному. При цьому не враховувався вплив рослинності, яка знаходиться у змінному електричному полі у зоні впливу ПЛ. Експериментальні дані на рисунку 4 наведені з урахуванням меж похибки приладу ВНЕП в робочому діапазоні вимірювання.

Слід відзначити, що похибка приладу є меншою за похибку вимірювань, оскільки при проведенні досліджень не враховувалися провідність поверхні, дія електричного поля Землі на вимірювальний прилад, а також похибки визначення місцезнаходження приладу.

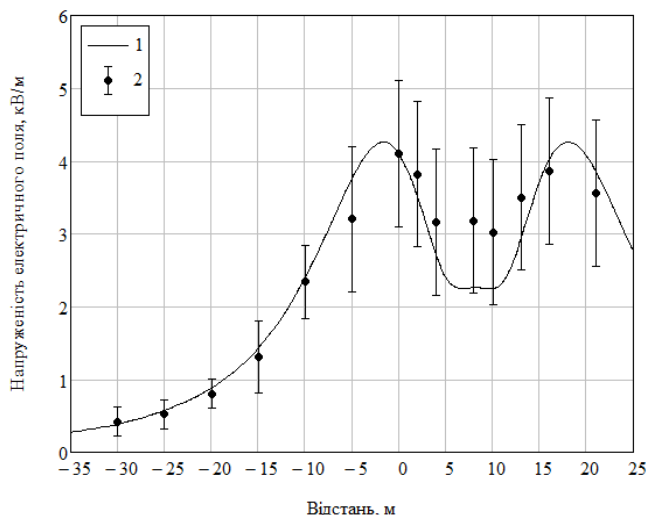


Рисунок 4 – Порівняння результатів вимірювання напруженості електричного поля під лінією електропередачі 330 кВ на висоті 1,8 м від землі з результатами розрахунку за методом еквівалентних зарядів для середини прогону: 1 – результати розрахунку для висоти 11,0 м від осі проводу до землі; 2 – результати вимірювань з урахуванням похибки приладу ВНЕП-50

Крива 1 побудована при припущенні, що відстань між проводами лінії і землею в середині прогону дорівнює 11,0 м, що відповідає найменшій відстані по вертикалі від проводів лінії до поверхні землі для ліній 330 кВ, прокладених в населеній місцевості, і яка нормована в [6]. Як видно з близькості кривих 1 і 2 на рисунку 3, таке припущення є достатньо справедливим.

Порівнявши криві 1 і 2, можна стверджувати, що метод еквівалентних зарядів дозволяє добре оцінити очікуване значення напруженості електричного поля в середині прогону 3 рисунку 4 також видно, що в межах санітарно-захисної зони напруженість електричного поля за температури досліджень не перевищує гранично допустимого рівня 5,0 кВ/м, який встановлений для населеної місцевості [2]. Однак, оскільки з підвищенням температури зростають стріли провисання, слід очікувати зростання максимальних значень напруженості відносно вимірюваних (при температурі досліджень 20<sup>0</sup>С), до неприпустимих величин.

Досліджувана ПЛ була побудована на початку 1990 років згідно діючими на той час Правилами улаштування електроустановок. При цьому було використано наступне нормативне нормування: по вітровому навантаженню -1 район (40 даН/м<sup>2</sup>), по ожеледі 3 район (стінка ожеледі – 15 мм). При вказаних умовах і використанні таких самих ізоляційних гірлянд для населеної місцевості максимальна стріла провисання мала дорівнювати 8,0 м, а для ненаселеної - 7,5 м. При використанні діючих на той час нормативів для населеної місцевості та прогоні довжиною 400 м відстань до поверхні землі при температурі 20<sup>0</sup>С повинна була становити 9,6 м, при температурі 30<sup>0</sup>С - 9,2 м та при температурі 40<sup>0</sup>С - 8,9 м.

Однак для нормативних умов, які зараз прийняті в Україні [6], для зони розташування досліджуваної ПЛ слід використовувати більш жорсткі вимоги (третій район по ожеледі при стінці 19 мм; максимальна температура траси 36<sup>0</sup>С). При цьому найбільша стріла провисання згідно монтажних таблиць має складати 17 м, що відповідає висоті підвішування проводів у 6,5 м. Ця висота є меншою за нормативну як на сьогодні, так і на час побудови ПЛ. Таким чином, напруженості електричного поля, які були закладені при проектуванні досліджуваної ПЛ, не відповідають сучасним вимогам, що потребує її реконструкції.

#### Висновки

У роботі здійснені вимірювання напруженості електричного поля частоти 50 Гц в межах одного прогону довжиною 400 м траси ПЛ 330 кВ при середній температурі 20<sup>0</sup>С за допомогою приладу ВНЕП-50.

Максимальне значення напруженості електричного поля під проводами фази в точці максимального наближення проводів фази до землі не перевищує гранично допустимого рівня 5,0 кВ/м. Наземні об'єкти, розташовані поблизу ПЛ, впливають на розподілення поля. Особливо наочно це видно для лінії з горизонтальним розташуванням проводів, коли внаслідок впливу наземних об'єктів, розташованих тільки з одного боку траси ПЛ, порушується симетрія картини поля лінії відносно середньої фази.

Порівняння результатів експерименту та чисельних розрахунків показало, що метод еквівалентних зарядів доцільно використовувати для оцінки рівня напруженості електричного поля високовольтних ПЛ.

Показано, що ПЛ, які побудовані до 2008 р, можуть з високим ступенем імовірності створювати неприпустимі рівні напруженості електричного поля.

На думку авторів, оскільки експериментальний метод дослідження та вимірювання напруженості електричного поля високовольтних ПЛ спрямовано на забезпечення екологічної безпеки людей та довкілля, він має бути відкоригований та введений в нормативну базу як обов'язковий, що потребує створення відповідних експериментальних методик.

Метою подальших досліджень є дослідження та аналіз розподілення електричного поля під лініями надвисокої напруги 330 та 750 кВ, уточнення методики вимірювань та розрахунків електричного поля.

#### **Список використаної літератури**

1. Щеглов, Н.В. Современные подходы к совершенствованию и развитию воздушных линий электропередачи / Н.В. Щеглов // Четвертая Российская научно-практическая конференция «Линии электропередачи 2010: проектирование, строительство, опыт эксплуатации и научно-технический прогресс, 2010. – С. 64-70.
2. ДСНіП №239 «Державні санітарні норми і правила захисту населення від впливу електромагнітних випромінювань». – К., 1996. – 18 с.
3. ДСНіП №476 Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів. – К., 2002. – 12 с.
4. ДНАОП 0.00-1.21-98 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів». – К., 1998. – 5 с.
5. СОУ-Н ЕЕ 20.179:2008 «Розрахунок електричного і магнітного поля лінії електропередавання. Методика». – К.: Державне підприємство «Український проектно-вишукувальний та конструкторсько-технологічний інститут «Сільенергопроект», 2008. – 34 с.
6. Правила улаштування електроустановок. 5-те вид., переробл. й доповн. – Х.: Міненерговугілля України, 2014. – 793 с.
7. Javadi, H. Electric field evaluation of 400 kV overhead transmission lines on the earth surface / H. Javadi, A. Mobarhani, A. Ameli // 5th IET International conference on system safety, 2010. – P. 1-5.
8. Carsimamovic, S. Experimental results of ELF electric and magnetic fields of electric power systems in Bosnia and Herzegovina / S. Carsimamovic, Z. Bajramovic, M. Rascic, M. Veledar, E. Aganovic, A. Carsimamovic // IEEE EUROCON – International conference on computer as a tool, 2011. – P. 1-4.
9. Вимірювач напруженості електричного поля ВНЕП. Настапова по експлуатації. – Вінниця: ВСО ВЕТ, 2004. – 10 с.
10. Бржезицький, В.О. Характеристики вимірювача напруженості електричного поля / В.О. Бржезицький, Я.В. Неділько, В.І. Хомініч // Наукові вісті НТУУ "КПІ", 2009. – № 5. – С. 41-44.
11. Suojanen, M. Effect of spruce forest on electric fields caused by 400 kV transmission lines / M. Suojanen, J. Vehmaskoski, S. Kuusiluoma, P. Trygg, L. Korpinen // International conference on power system technology, 2000. – Vol. 3. – P. 1401-1405.
12. Белогловский, А.А. Методы расчета электрических полей в примерах и задачах. Учебное пособие. / А.А. Белогловский, И.В. Пашинин. – М.: МЭИ, 2007. – 82 с.
13. Mujezinovic, A. Electric field calculation around of overhead transmission lines in Bosnia and Herzegovina / A. Mujezinovic, A. Carsimamovic, S. Carsimamovic, A. Muharemovic, I. Turkovic, // International symposium on electromagnetic compatibility (EMC Europe), 2014. – P. 1001-1006.
14. Okrainskaya, I.S. Electromagnetic environment under overhead power transmission lines 110-500 kV / I.S. Okrainskaya, A.I. Sidorov, S.P. Gladyshev // International symposium on power electronics, electrical drives, automation and motion (SPEEDAM), 2012. – P. 796-801.

**V.O. Brzhezitskiy, V.M. Suleymanov, Ye.O. Trotsenko, V.I. Hominich, A.G. Kulakevich**  
**National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"**

#### **EXPERIMENTAL STUDY OF THE ELECTRIC FIELD OF 330 kV HIGH VOLTAGE ALTERNATING CURRENT OVERHEAD TRANSMISSION LINE**

*The experimental values of the electric field at a height of 1.8 m from the ground surface in the area of electromagnetic effects of 330 kV high voltage overhead line at the intermediate span length of 400 m between two supports type POD-8 (P330-9) with hanging garlands (19 suspended linear insulators of the type PS-120), split phase (2xAC 330/39) with a step of 0.4 m in cleavage are discussed. As a diagnostic tool used device WNEP-50 with a range from 0.5 to 48 kV/m. The limit of permissible basic error in the primary measurement range (from 3 to 48 kV/m) - not more than ±10%, in the the additional range (from 2 to 0.5 kV/m) - not more than ±20%. A comparison of the experinmental values with the results of calculation and normative data is carried out. The direction of further research is formulated.*

**Keywords:** electric field intensity, high voltage overhead transmission lines, environmental impact, health and safety and security zones, electric field limiting value, the device WNEP-50.

**References**

1. Scheglov, N.V. (2010). Sovremennyye podhody k sovershenstvovaniyu i razvitiyu vozdushnykh liniy elektroperedachi. Chetvertaya Rossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Liniy elektroperedachi 2010: proektirovanie, stroitelstvo, opyt ekspluatatsii i nauchno-tehnicheskii progress, 64-70.
2. DSNIP #239 (1996). Derzhavni sanitarni normi i pravila zahistu naselennya vid vpyvu elektromagnitnih viprominyuvan.. Kyiv, 18.
3. DSNIP #476 (2002). Derzhavni sanitarni normi i pravila pri roboti z dzherelami elektromagnitnih poliv. Kyiv, 12.
4. DNAOP 0.00-1.21-98 (1998). Pravila bezpechnoy ekspluatatsiyi elektroustanovok spozhivaciyv. Kyiv, 5.
5. SOU-N EE 20.179:2008 (2008). Rozrahunok elektrichnogo i magnitnogo polya liniyi elektroperedavannya. Metodika. Kyiv. Derzhavne pidpriemstvo "Ukrayinskiy proektno-vishukuvalniy ta konstruktorsko-tehnologichniy institut "Silenergoproekt", 34.
6. Pravila ulashtuvannya elektroustanovok (2014). 5-te vid., pererobl. y dopovn. Xarkiv. Minenergogugillya Ukrayini, 793.
7. Javadi, H., Mobarhani, A., Ameli, A. (2010). Electric field evaluation of 400 kV overhead transmission lines on the earth surface. 5th IET International conference on system safety, 1-5.
8. Carsimamovic, S., Bajramovic, Z., Rascic, M., Veledar, M., Aganovic, E., Carsimamovic, A. (2011). Experimental results of ELF electric and magnetic fields of electric power systems in Bosnia and Herzegovina. IEEE EUROCON – International conference on computer as a tool, 1-4.
9. Vimiryuvach napruzhenosti elektrichnogo polya VNEP (2004). Nastanova po ekspluatatsiyi. Vinnitsya. VSO VET, 10.
10. Brzhezitskiy, V.O., Nedilko, Ya.V., Hominich, V.I. (2009). Harakteristiki vimiryuvacha napruzhenosti elektrichnogo polya. Naukovi visti NTUU "KPI", Vol 5., 41-44.
11. Suojanen, M., Vehmaskoski, J., Kuusiluoma, S., Trygg, P., Korpinen, L. (2000). Effect of spruce forest on electric fields caused by 400 kV transmission lines. International conference on power system technology, Vol. 3, 1401-1405.
12. Beloglovskiy, A.A., Pashinin, I.V. (2007). Metodyi rascheta elektricheskikh poley v primerah i zadachah. Uchebnoe posobie. Moscow. MEI, 82.
13. Mujezinovic, A., Carsimamovic, A., Carsimamovic, S., Muharemovic, A., Turkovic, I. (2014). Electric field calculation around of overhead transmission lines in Bosnia and Herzegovina. International symposium on electromagnetic compatibility (EMC Europe), 1001-1006.
14. Okrainskaya, I.S., Sidorov, A.I., Gladyshev, S.P. (2012). Electromagnetic environment under overhead power transmission lines 110-500 kV. International symposium on power electronics, electrical drives, automation and motion (SPEEDAM), 796-801.

**В.А. Бржезицкий**, д-р техн. наук, проф., **В.Н. Сулейманов**, канд. техн. наук, проф.,  
**Е.А. Троценко**, канд. техн. наук, доц., **В.И. Хоминич**, канд. техн. наук, доц., **А.Г. Кулакевич**, магистрант  
**Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»**  
**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ**  
**ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**  
**КЛАССА 330 кВ**

*Приведены экспериментальные значения напряженностей электрического поля на высоте 1,8 м от поверхности земли в зоне электромагнитного влияния высоковольтной воздушной линии класса 330 кВ на промежуточном пролёте длиной 400 м между двумя опорами типа ППОД- 8 (П330-9) с подвесными гирляндами (19 подвесных линейных изоляторов типа ПС-120), расщеплённой фазой (2хАС 330/39) с шагом расщепления 0,4 м. В качестве средства диагностики использован прибор ВНЕП-50 с диапазоном измерения от 0,5 до 48 кВ/м. Предел допустимой основной приведенной погрешности на основном диапазоне измерения (от 3 до 48 кВ/м) - не больше  $\pm 10\%$ , на дополнительном диапазоне (от 2 к 0,5 кВ/м) - не больше  $\pm 20\%$ . Проведено сравнение полученных значений напряженностей с расчетными и нормативными данными. Определено направление дальнейших исследований.*

**Ключевые слова:** напряженность электрического поля, высоковольтные воздушные линии электропередачи, экологическое влияние, санитарно-защитные и охранные зоны, предельно допустимые нормы напряженности, прибор ВНЕП-50.

Надійшла 29.02.2016

Received 29.02.2016