

## ДО РОЗРАХУНКУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МІЦНОСТІ МАЛОГАБАРИТНОГО ВВОДУ МОБІЛЬНОЇ ПОВІРОЧНОЇ ЛАБОРАТОРІЇ

*Розроблена методика визначення просторової траєкторії розвитку електричного стримера в малогабаритному високовольтному вводі мобільної повірочної лабораторії, яка враховує тривимірну конструкцію вводу.*

*Разработана методика определения пространственной траектории развития электрического стримера в малогабаритном высоковольтном вводе мобильной поверочной лаборатории, которая учитывает трехмерную конструкцию ввода.*

### ВСТУП

Одним з недоліків існуючих на даний час мобільних повірочних лабораторій (МПЛ), призначених для перевірки трансформаторів напруги (ТН) до 110 кВ включно, є їх конструкція, яка забезпечує працездатність МПЛ у так званому "розгорнутому" варіанті, при якому для роботи на місці перевірки необхідно вносити з автомобіля еталонне устаткування [1]. Тому роботи по забезпеченню експлуатації МПЛ без виносу еталонного устаткування є актуальним науковим завданням. Для забезпечення працездатності МПЛ у цьому варіанті вона повинна бути оснащена високовольтним малогабаритним вводом, що забезпечує введення високої напруги крізь кузов автомобіля, на шасі якого змонтовано МПЛ, до її високовольтного відсіку [1]. В даний час в країнах СНД комплект устаткування МПЛ для перевірки ТН до 110 кВ монтується переважним чином на шасі автомобіля ГАЗ-2705, або подібних автомобілів вантажопідйомністю порядку 1300 кг та довжиною порядку 5,5 м. Використання типових високовольтних ввідів (таких, як маслобар'єрні, паперово-масляні прохідні ізолятори з конденсаторними обкладками або маслонаповнені вводи вагою 380-470 кг та довжиною 2,6-3,1 м [2]) на робочу напругу 110 кВ для даного випадку є неприйнятним, оскільки їх розміри та вага стають порівнянними з автомобілем. В результаті виникає необхідність в розробці нового типу високовольтного електроустаткування - малогабаритного високовольтного вводу, який не має порцелянової покривки, і в якому в якості внутрішньої ізоляції використовується атмосферне повітря. Розрахунок електричної міцності такого вводу можливий з використанням стримерної теорії розряду та її розвитку.

Незважаючи на інтенсивні дослідження, проведені протягом століття, закінчена теорія електричного пробою газів до теперішнього часу відсутня. Існує значна кількість моделей, які інтерпретують різні стадії пробою найчастіше з діаметрально протилежних позицій.

Теоретичні уявлення про механізм стримерного пробою формувалися головним чином на основі класичних досліджень розрядних процесів [3-5]: лавинно-стримерної теорії Таунсенда (1900-1901 р.), теорій Леба, Міка, Ретера (1938-1940 р.), створених для опису розряду в коротких проміжках з однорідним полем.

Результати дослідження моделей плоскої хвилі іонізації показують, що її поширення можливе тільки в зовнішньому полі з напруженістю, що перевищує критичне значення  $E_{кр}$ , при якому швидкість іонізації молекул газу електронним ударом перевершує швидкість втрат електронів внаслідок прилипання і рекомбінації і яке для повітря при нормальних умовах становить близько 30 кВ/см [6]. У той же час експериментальні дані свідчать про те, що стример може досить стійко поширюватися в довгих проміжках при істотно менших середніх значеннях напруженості зовнішнього поля (близько 4-5 кВ/см) [6, 7]. Це має принципове

значення для оцінок електричної міцності, тому що, зароджуючись у сильному електричному полі, розряд може поширюватися у відносно слабкому зовнішньому полі "і навіть без нього" [6]. Знання умов виникнення електричного пробою повітря в сильно неоднорідному полі важливо для оцінки надійності ізоляції електротехнічного устаткування.

### 1. МОДЕЛІ ДОСЛІДЖЕННЯ СТРИМЕРА ТА ЇХ НЕДОЛІКИ

Процес розвитку електричного пробою може бути описаний шляхом математичного моделювання його електрофізичних процесів на стримерній стадії.

Через велику трудомісткість розрахунків можливості двовимірного моделювання в даний час обмежені короткими проміжками (не більше 1-2 см). Тому більшість результатів, представлених в літературі, отримані у квазидвовимірній моделі стримерного розряду [6, 8, 9]. Незважаючи на спрощення квазидвовимірної моделі, до яких відноситься одновимірне поширення розрядної плазми і фіксований радіус каналу стримера, результати дослідження у вигляді одержуваних просторово-часових залежностей фізичних характеристик розряду таких, як концентрації заряджених часток, напруженість електричного поля, електричний струм, питома Джоулева потужність, з певною вірогідністю описують властивості реального фізичного об'єкта і дозволяють установити ступінь значимості того або іншого фактора, що впливає на динаміку стримера і швидкість поширення плазми електричного пробою.

У даний час динамічні властивості стримера досліджуються на основі різних варіацій квазидвовимірної моделі, запропонованої в [10]. Основні положення цієї моделі полягають у наступному:

- канал розряду розглядається як циліндр фіксованого радіуса  $r_c$ , що подовжується в процесі поширення;
- рух заряджених часток відбувається тільки уздовж осі каналу;
- радіальний розподіл щільності заряду уздовж перетину вважається заданим, не змінним в процесі розвитку;
- напруженість електричного поля, що діє на заряди, обчислюється на осі каналу.

Таким чином, дана модель описує динаміку "заряджених дисків" уздовж осі розряду.

Електричне поле, створюване зарядами, у такій постановці можна визначати як суперпозицію полів нескінченно тонких заряджених дисків (метод дисків) [6]. Сумарна напруженість електричного поля на осі системи складається зі складових напруженостей зовнішнього електричного поля, що мали б місце при відсутності зарядів, поля заряджених дисків і поля, створюваного відбиттями зарядів  $\rho$  на електродах.

Для квазидвовимірної моделі всі фізичні величини залежать від однієї просторової координати  $x$ , що

істотно спрощує рішення. Фіксований радіус каналу стримера  $r_c$  є параметром моделі.

Перевагою такої моделі є можливість розрахувати на її основі динамічні характеристики стримера при задовільній точності опису електричного поля в областях фронту і "гострого" електрода, що при двовимірних розрахунках електричного поля вимагає десятків годин машинного часу навіть на суперкомп'ютерах з продуктивністю в декілька десятків терафлопс [11].

Основним недоліком таких моделей є те, що всі вони не дають відповіді на питання: чи відбудеться перекриття складного міжелектродного проміжку при заданому значенні напруги, прикладеної до високовольтного електрода? Це питання є основним при проектуванні нового малогабаритного високовольтного устаткування. Тому, пропонується розробити просту, але в той же час тривимірну модель для визначення просторової траєкторії поширення стримера з наступним визначенням можливості перекриття проміжку уздовж цієї траєкторії.

Дане завдання може бути вирішене на сучасних персональних комп'ютерах за допомогою прикладного програмного забезпечення для розрахунку тривимірних електромагнітних полів, наприклад, пакета Femlab [12].

Метою даної статті є розробка інженерної методики визначення просторової траєкторії розповсюдження електричного стримера у малогабаритному високовольтному ввіді МПЛ, яка враховує його тривимірну конструкцію.

## 2. ТРИВИМІРНА МОДЕЛЬ ПОШИРЕННЯ СТРИМЕРА

В усіх існуючих моделях стримера канал розряду розглядається як найпростіша геометрична фігура, наприклад, як циліндр фіксованого радіуса, що подовжується в процесі поширення у квазидвовимірній моделі стримера. Однак у середовищі Femlab важко представити скривлений у просторі стример навіть окремими циліндрами фіксованого радіуса. В цьому випадку немає необхідності моделювати весь процес "проростання" стримера в конструкції, а можна обмежитись розрахунком найбільш ймовірного шляху перекриття міжелектродного проміжку малогабаритного вводу МПЛ. В якості цього шляху може бути прийнята просторова траєкторія, яку залишає за собою скруглений циліндр фіксованої довжини  $l_0$  і радіусу  $r_0$ , що починає свій "рух", наприклад, з найбільш напруженої точки на заземленому електроді в напрямку високовольтного електрода. В даній моделі скруглений циліндр, що "рухається" з найбільш напруженої точки, власне, і представляє собою модель голівки стримера. Зазначимо, що моделі Даусона і Віна [13] голівка катодонаправленого стримера також представлялася сферою фіксованого радіуса.

В Femlab, як і в інших пакетах, заснованих на методі кінцевих елементів і, отже, призначених для замкнутих розрахункових областей, при розрахунку електричного поля у відкритих областях необхідно штучно обмежувати розрахункову область таким чином, щоб вона не впливала на значення електричного поля в розрахункових точках. З урахуванням цієї області, зовнішні розміри моделі по осях  $X, Y, Z$  можуть становити 1-2 м. У той же час стример моделюється циліндром довжиною  $l_0$  та діаметром  $2r_0$  з двома півсферами на кінцях радіусом  $r_0$  (порядку 2,5 мм, що мінімально можливе для обраної моделі), із чого зрозуміло, що розмір сітки кінцевих елементів у моделі повинен бути менше радіуса сфери  $r_0$ . Очевидно, що в

моделі зазначених розмірів сітка буде містити значну кількість вузлів, що зажадає дуже продуктивного комп'ютера. З іншої сторони було встановлено, що можливості Femlab не дозволяють зменшувати розрахункову сітку в складній тривимірній моделі, розміри різних елементів якої відрізняються на 3-4 порядки.

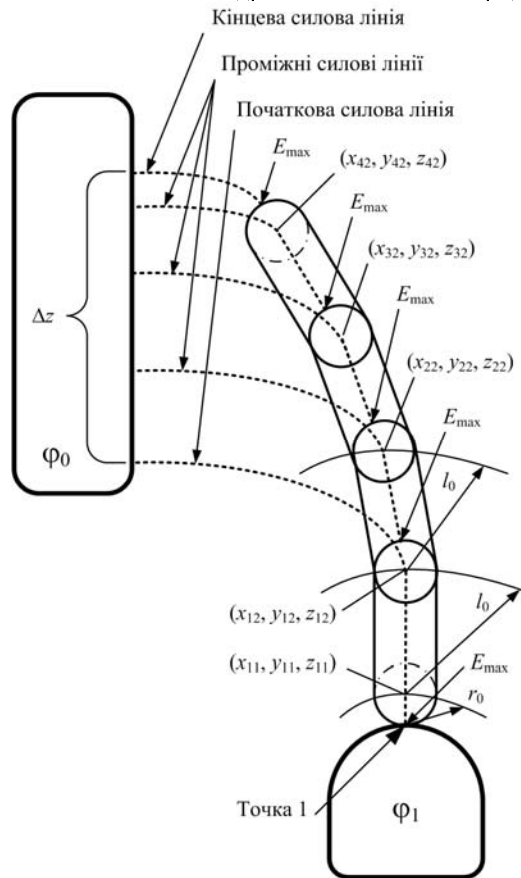


Рис. 1. До пояснення методу циліндра, "що рухається"

Розглянемо фрагмент моделі рис. 1, на якій представлений високовольтний електрод з малим радіусом кривизни, що знаходиться під високим потенціалом  $\Phi_1$  і електрод з великим радіусом кривизни, що знаходиться під нульовим потенціалом.

Стример розвивається із точки 1 з найбільшою напруженістю на високовольтному електроді. В середовищі Femlab визначення просторової траєкторії стримера за допомогою циліндра, що рухається, виконується у відповідності з наступним алгоритмом (рис. 1):

1) Проводимо виділену силовою лінією, що виходить із точки 1. Ця лінія є початковою лінією уздовж якої буде розвиватися розряд. На кожній наступній ітерації уточнюється положення цієї лінії.

2) Знаходимо координати початку 1-го циліндра. Для цього із точки 1 проводиться дуга радіусом  $r_0$  до перетинання із виділеною силовою лінією, координати отриманої точки перетинання  $(x_{11}, y_{11}, z_{11})$  і є координати початку 1-го циліндра. [При поясненні будемо притримуватися такої індексації координат точок: перша цифра індексу – це номер циліндра; друга цифра індексу – це позначення початку (1) або кінця (2) циліндра].

3) Знаходимо координати кінця 1-го циліндра. Для цього із точки  $(x_{11}, y_{11}, z_{11})$  проводиться дуга радіусом  $l_0$  до перетинання із виділеною силовою лінією, координати отриманої точки перетинання  $(x_{12}, y_{12}, z_{12})$  і є координати кінця 1-го циліндра. Знайдені точки з координатами  $(x_{11}, y_{11}, z_{11})$  і  $(x_{12}, y_{12}, z_{12})$  – це

координати осі циліндра, і в них також розміщуються сфери радіуса  $r_0$  для скруглення торців циліндра. Циліндру надається потенціал електрода, з якого починається розряд.

4) Розраховується картина поля отриманої геометричної моделі (малогабаритний ввід з циліндром в просторі).

5) На поверхні скругленого сферичного торця циліндра визначається точка з максимальною напруженістю.

6) Після локалізації точки з максимальною напруженістю з неї проводиться наступна виділена силова лінія.

7) Визначаємо координати 2-го циліндра. Координати початку 1-го циліндра – це в той же час і координати кінця 1-го циліндра, тобто  $(x_{21}, y_{21}, z_{21}) = (x_{12}, y_{12}, z_{12})$ . Знаходимо координати кінця 2-го циліндра. Для цього із точки  $(x_{21}, y_{21}, z_{21})$  проводиться дуга радіусом  $l_0$  до перетинання із виділеною силовою лінією, координати отриманої точки перетинання  $(x_{22}, y_{22}, z_{22})$  і є координати кінця 2-го циліндра. Знайдені точки з координатами  $(x_{21}, y_{21}, z_{21})$  і  $(x_{22}, y_{22}, z_{22})$  – це координати осі циліндра, і в них також розміщуються сфери радіуса  $r_0$  для скруглення торців циліндра. Циліндру так само надається потенціал електрода, з якого починається розряд.

8) В моделі знищується 1-й циліндр і залишається 2-й, таким чином моделюється рух голівки стримера. Розраховується картина поля отриманої геометричної моделі (малогабаритний ввід з циліндром в просторі).

9) Наведений алгоритм повторюється доти, поки черговий циліндр не досягне протилежного електрода. Ламана лінія, що проходить через точки  $(x_{i1}, y_{i1}, z_{i1})$  і  $(x_{i2}, y_{i2}, z_{i2})$  являє собою просторову траєкторію перекриття проміжку.

В такій моделі кінцева точка останньої силової лінії (траєкторія розвитку стримера) зсувається відносно кінцевої точки початкової силової лінії на певну величину  $\Delta z$  (рис. 1).

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Згідно з вищевказаною методикою був виконаний розрахунок електричного поля малогабаритного вводу МПЛ, загальний вид якого зображено на рис. 2. Ввід МПЛ складається з заземленого фланця, струмоведучого стрижня з діелектричною втулкою і несучих ізолюючих конструкцій (рис. 2). З метою зменшення розрахункової області і з врахуванням симетрії конструкції було змодельовано 1/3 реальної конструкції (рис. 3).

Розрахунок електричного поля дозволив локалізувати точку з максимальною напруженістю на фланці, з якої, відповідно починається розряд і провести з неї початкову силову лінію (рис. 4), вздовж якої і відбувається моделювання перекриття за наведеною вище методикою. Для наочності результуючі криві, отримані при моделюванні методом циліндра, "що рухається", зобразимо в радіальній площині  $ZOX$  (рис. 5). Крива 2 на рис. 4 зображена на рис. 5 під номером 4, а точка 1 на рис. 4 позначена на рис. 5 номером 3.

В літературі розглядаються дві моделі стримерного процесу, засновані на крайніх припущеннях: про "абсолютну" ізоляцію стримерної голівки і про ідеальну провідність стримерного каналу [14]. У реальності реалізується якийсь проміжний варіант і стример має проміжну провідність. У даній роботі були визначені ці обидві просторові траєкторії розвитку стримера за допомогою програми Femlab [12] для умов МПЛ-110. Перша траєкторія - це просторова траєкто-

рія стримера з малою провідністю, що співпадає із силовою лінією початкової картини поля довжиною 14,1 см (рис. 5, крива 4). Для розрахунку другої траєкторії рух голівки стримера моделювався методом циліндра, "що рухається". Це дозволило отримати криву 5 на рис. 5 довжиною 16,1 см.

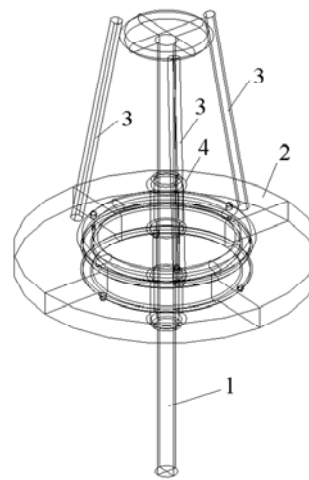


Рис. 2. Малогабаритний ввід МПЛ-110:  
1 – струмоведучий стрижень;  
2 – заземлений фланець;  
3 – несучі ізолюючі конструкції; 4 – діелектрична втулка

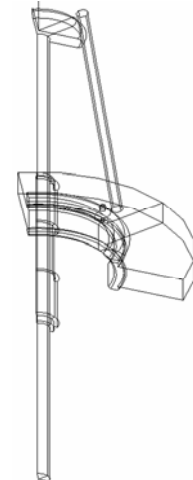


Рис. 3. Фрагмент розрахункової моделі вводу МПЛ-110

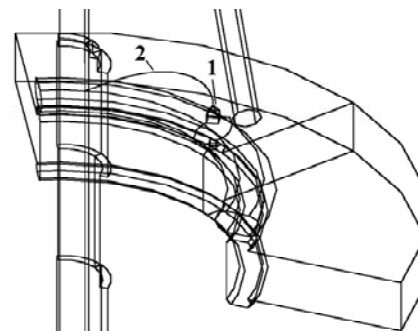


Рис. 4. Локалізація точки максимальної напруженості  
1 – точка максимальної напруженості на фланці;  
2 – початкова силова лінія проведена з точки максимальної напруженості

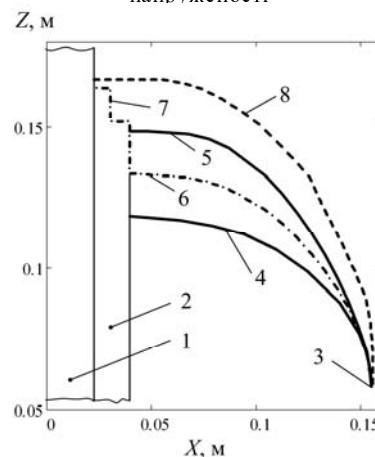


Рис. 5. Розрахунок траєкторій можливого перекриття вводу МПЛ-110:

1 – струмоведучий стрижень; 2 – діелектрична втулка; 3 – точка максимальної напруженості; 4 – початкова силова лінія; 5 – траєкторія перекриття з фланця на стрижень, визначена за механізмом розділу 2; 6 – середня лінія відносно кривих 4 і 5; 7 – шлях перекриття по поверхні втулки; 8 – траєкторія перекриття зі стрижня на фланець, визначена за механізмом розділу 2

Оскільки стример все-таки має деяку проміжну провідність, його реальна траєкторія перебуває між цими двома лініями. Його моделюємо еквідистантною кривою 6 довжиною 15,0 см. Загальний шлях розряду з фланця може бути виражений сумою ліній 6 і 7 на рис. 5., що становить 19,8 см.

2-й можливий варіант перекриття – розряд з верхні струмоведучого стрижня на заземлений фланець. Застосовуючи метод циліндра, "що рухається" було отримано криву 8 на рис. 5 довжиною 19,5 см. Серед розрахованих кривих необхідно вибрати найкоротшу, яку можна вважати за найбільш ймовірний шлях перекриття. Найкоротшою є крива 8, середня

напруженість вздовж якої дорівнює  $E = \frac{90 \cdot \sqrt{2}}{19,5} = 6,5$

кВ/см, що суттєво перевищує критерій перекриття 4-5 кВ/см [6] і свідчить про можливість перекриття даного проміжку по даній траєкторії. Проведене експериментальне випробування показало, даний проміжок не витримує випробувальну напругу  $U = 90 \cdot \sqrt{2} = 128$  кВ (ампл.) і перекривається при 112 кВ (ампл.), причому, по траєкторії кривої 8. Тому у ввіді МПЛ-110 [15, 16] з урахуванням проведеного дослідження було збільшено шлях ймовірного перекриття і використано додаткове профілювання втулки вводу, що унеможливило його перекриття при випробувальній напрузі.

#### ВИСНОВКИ

Для вирішення задачі з визначення витримуваної напруги розроблена методика визначення просторової траєкторії розповсюдження електричного стримера у малогабаритному високовольтному ввіді МПЛ, яка враховує його тривимірну конструкцію. В основу методики покладено визначення просторової траєкторії, яку залишає за собою скруглений циліндр, "що рухається" між найбільш напруженими точками досліджуваної конструкції. Методика дає відповідь на питання про можливість електричного перекриття електрично го устаткування, що підтверджено експериментом.

Метою подальших досліджень слід вважати розробку другої стадії методики – визначення можливості перекриття малогабаритного високовольтного вводу по розрахованій траєкторії стримера.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бржезицький В.О. Троценко С.О., Куць А.А. Аспекти створення мобільних повірочних лабораторій для перевірки трансформаторів напруги і струму // Доповіді за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів "Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматики". – Київ: "Політехніка", 2008. – 482 с. – С. 445-446.
2. Справочник электрика промышленных предприятий / Под общей редакцией А.А. Федорова и П.В. Кузнецова – М: Государственное энергетическое издательство, 1954. – 1040 с.
3. Лёб Л. Основные процессы электрических разрядов в газах. М.-Л.: Гостехтеоретиздат, 1950. – 672 с.
4. Мик Дж., Крэгс Дж. Электрический пробой в газах. М.: Изд-во иностр. лит., 1960.
5. Петер Г. Электронные лавины и пробой в газах. М.: Мир, 1968. – 390 с.

6. Физические основы электрического пробоя газов / А.Ф. Дьяков, Ю.К. Бобров, А.В. Сорокин, Ю.В. Юргеленас; Под ред. А. Ф. Дьякова. – М: Издательство МЭИ, 1999. – 400 с.
7. Allen N.L., Ghaffar A. The conditions required for the propagation of a cathode-directed positive streamer in air // J. Phys. D: Appl. Phys. 1995. Vol. 28. №2. P. 331-337.
8. Пашинин И.В., Белогловский А.А., Матвеев Д.А., Гусев А.А., Белоусов С.В. Математическое моделирование электрического разряда в газах при анализе процессов в наносекундной импульсной стримерной короне // Электронный журнал "Новое в российской электроэнергетике". – 2006. – № 3. – С. 14-29.
9. Яковленко С.И. Механизм распространения стримера к аноду и к катоду, обусловленный размножением электронов фона // Электронный журнал "Исследовано в России". – 2004. – № 9. – С. 86-100.
10. Davies A.J., Evans C.J., Llewellyn-Jones F. Electrical breakdown in gases: the spatio-temporal growth of ionization in fields distorted by space charge // Proc. Roy. Soc. 1964. Vol. 281. P. 164-183.
11. Morrow R., Lowke J.J. Streamer propagation in air // J. Phys. D: Appl. Phys. 1997. Vol. 30. P. 614-627.
12. FEMLAB User's Guide and Introduction // FEMLAB 2.3. COMSOL. Inc. -1994-2002. - 436 p.
13. Dawson G. F., Winn W. P. A model for streamer propagation // Z. Phys. 1965. Bd.183. S.159-171.
14. Райзер Ю. П. Физика газового разряда: Учеб. руководство. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 592 с.
15. Бржезицький В.О., Бржезицький В.В., Ісаєв В.В., Кікало В.М., Лапченко А.М., Маслюченко І.М., Троценко С.О. Мобільна повірочна лабораторія класів напруги 0,22...110 кВ // Метрологічне забезпечення обліку електричної енергії: Матер. 6-ої наук.-практ. конф. / Уклад.: В.М. Кікало, С.В. Білоус. – К.: АБЕГА, 2007. – С. 202-204.
16. Бржезицький В.О., Бржезицький В.В., Волощенко В.В., Кікало В.М., Маслюченко І.М., Троценко С.О. Еталонні високовольтні трансформатори напруги тороїдального типу // Метрологічне забезпечення обліку електричної енергії: Матер. 6-ої наук.-практ. конф. / Уклад.: В.М. Кікало, С.В. Білоус. – К.: АБЕГА, 2007. – С. 96.

Поступила 30.08.2009

Бржезицький Володимир Олександрович, д. т. н., професор  
тел.: (044) 241-76-35

Троценко Євгеній Олександрович,  
Маслюченко Ігор Миколайович

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", кафедра техніки та електрофізики високих напруг,  
тел.: (044) 454-92-37

Україна, 03056, Київ-56, проспект Перемоги, 37,

#### V.A. Brzhezitsky, E.A. Trotsenko, I.N. Masluchenko Calculation of electric strength of a small-size bushing of a mobile verification laboratory

A calculation procedure for a spatial trajectory of an electric streamer propagation in a small-size high-voltage bushing of a mobile verification laboratory is developed with allowance for 3D design of the bushing.

**Key words – mobile verification laboratory, small-size bushing, calculation procedure**