

Vorob'ev A.A., Vorob'ev P.A., Chepikov A.T. Rossijskaja akademija estestvennyh nauk. Nauchnoe otkrytie: Zakonomernost' proboja tverdogo dijelektrika na granice razdela s zhidkim dijelektrikom pri dejstvii impul'sa naprjazhenija. Diplom № 107. – М.: 1999. – Registracionnyj № 122. - Prioritet 14 dekabnja 1961 g. 5. Vorob'ev G. A. Jeffekt vnedrenija razrjada v tverdij dijelektrik, pogruzhennyj v izolirujushhuju zhidkost' *Pis'ma v ZhTF*. 2005. Vol.75, No. 4. 125–127. Print. 6. Belousov F. A. Vlijanie jelektricheskogo polja po diffuziju vody v polimernoj izoljacii : avtoref. dis. na soiskanie uchenoj stepeni kand. tehn. nauk : spec. 05.09.02 «Jelektrotehnicheskie materialy i izdelija» / Belousov Fedor Anatol'evich ; Sankt-Peterburgskij gos. tehn. un-t – Sankt-Peterburg, 2000. 7. Brzhezic'kij V. O., Isakova A. V., Rudakov V. V. *Tehnika i elektrofizika visokih naprug: Navch posibnik* Harkiv: NTU „HPI” – Tornado, 2005. 8. Gurin A. G. Gontar' Ju. G. Razrushenie poverhnostnogo sloja dijelektrika v koncevnyh kabel'nyh muftah pod dejstviem grozovyh perenaprjazhenij *Sbornik nauchnyh trudov "Vestnik NTU "HPI" : Energetika: nadijnist' ta energoefektivnist'* No 59. 2013. 9. Vorob'ev G. A. Ehanin, S. G. Nesselov N. S. *Jelektricheskij proboj tverdych dijelektrikov Fizika tverdogo tela*. No 6. 2005. 1048–1052. Print 10. John Grainger, William Stevenson Jr. *Power System Analysis*. McGraw-Hill Education (India), 2003.

Надійшла (received) 24.03.2014

УДК 551.594.221

А.О. КУКСОВ, бакалавр, НТУ «ХПИ»;
О.О. ПЕТКОВ, докт. техн. наук, с.н.с., НТУ "ХПИ"

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВЛУЧЕННЯ РОЗРЯДУ ДОВГОЇ ІСКРИ В ТОЧКИ ПЛОЩИНИ В НЕОДНОРІДНОМУ ПОЛІ

У статті запропонована двокрокова імітаційна модель влучення розряду довгої іскри в площину. Підтверджено адекватність розробленої моделі. Наведено результати чисельного імітаційного моделювання імовірнісного процесу влучення довгої іскри в площину. Здійснено порівняння результатів моделювання щільності розподілу точок ураження з даними експерименту.

Ключові слова: чисельне моделювання, електричний розряд, щільність розподілу

Постановка проблеми. В результаті стрімкого розвитку електротехніки та електроенергетики, оснащення високочутливою електронікою різного обладнання та зростання його ціни все більш гостро постає питання надійності захисту встановленого обладнання від ураження блискавкою, яка являє собою багатоступінчатий розряд довгої іскри в атмосфері. Одним з аспектів забезпечення надійності роботи заглибленого обладнання, розташованого безпосередньо під поверхнею ґрунту (обладнання складів, комунікацій і т.п.), є вивчення закономірностей розподілу точок ураження фінальним розрядом блискавки. Для визначення розподілу ймовірностей влучення довгої іскри в площину в лабораторних умовах, необхідні значні витрати ресурсів. Останнім часом, з розвитком комп'ютерної техніки, все більше уваги приділяють розрахунковими моделями, які потребують менше часових і матеріальних ресурсів, а також дають можливість імітувати широкий діапазон зміни параметрів розряду довгої іскри.

Аналіз публікацій. Розробка моделей ураження об'єктів блискавкою, необхідна для дослідження надійності систем блискавкозахисту, але, в силу складності процесу, в теперішній час немає моделі, яка в повному об'ємі достовірно описувала б розподіл точок ураження площини довгою іскрою. Даному напрямку присвячена низка досліджень.

В [1] досліджувався розподіл точок ураження площини розрядом довгої іскри в розрядному проміжку довжиною 5 м.

© А. О. Кусков, О. О. Петков, 2014

Отримані результати були використані для вивчення захисних властивостей стрижневих блискавковідводів.

В роботі [2] наведено результати експериментальних даних по статистичному розподілу точок ураження заземленої площини в системі стрижень-площина у закритому приміщенні. При обробці даних була визначена кількість точок ураження для кожного з секторів досліджуваної зони площини. Експеримент проводився при позитивній полярності стрижня, максимальна напруга на виході ГІН не перевищує 800 кВ.

В [3] аналізуються експериментальні дані по ураженню заземленої площини та розташованих на ній об'єктів електричним розрядом з максимальним значенням напруги 1,2 МВ та довжиною розрядного проміжку – 3 м. Експерименти проводилися на відкритому просторі.

В [4] розглянуто статистичну модель розряду блискавки на об'єкт-стрижень, який розташований на нескінченному прямому провіднику. Модель має двоступінчатий характер. Показано залежність ймовірності ураження стрижня від величини півінтервалу горизонтального зміщення розряду. Моделювання проводилося при висоті початку руху розряду $H = 10$ м та висоті об'єкта-стрижня $h = 2$ м. Дана модель передбачає випадковість значень кута руху розряду та дає оцінку процесу ураження об'єкта-стрижня у вигляді ймовірності ураження.

Як показує проведений аналіз, останнім часом, значна частина досліджень в галузі блискавкозахисту направлена на формування набору експериментальних даних по ураженню довгою іскрою площини та розташованих на ній об'єктів. Отримані результати дозволяють удосконалити розроблені моделі ураження площини довгою іскрою та перевірити адекватність моделей експериментальним даним.

Мета роботи. Розробка двокрокової моделі влучення розряду довгої іскри в площину та імітаційне моделювання щільності розподілу точок ураження площини довгою іскрою.

Результати дослідження. Розглянемо двокрокову модель ураження площини Q розрядом довгої іскри. На першому кроці (дивись рисунок 1) розряд рухається прямолінійно з початкової точки m в напрямку, який визначається випадковими значеннями кутів θ_1 і α_1

Довжина розряду на першому кроці фіксована і менша довжини розрядного проміжку $R_1 < H_1$. Величина розрядного проміжку приймається постійною.

Випадкові кути мають рівномірний розподіл з такими щільностями:

$$f(\theta_1) = \begin{cases} \frac{1}{\theta_{1\max}}, & \text{при } \theta_1 \in [0; \theta_{1\max}), \\ 0, & \text{при } \theta_1 \notin [0; \theta_{1\max}). \end{cases} \quad (1)$$

$$f(\alpha_1) = \begin{cases} \frac{1}{2\pi}, & \text{при } \alpha_1 \in [0; 2\pi), \\ 0, & \text{при } \alpha_1 \notin [0; 2\pi). \end{cases} \quad (2)$$

Кінцева точка руху іскри на першому кроці T_1 має проекцію O_1 на площину Q з полярними координатами $\varphi = \alpha_1$ та $\rho = r_1$ в системі з віссю OX , і декартові координати в системі XYZ : $X = x_1$, $Y = y_1$, $Z = 0$. Як видно із рисунка 1, Z -координата кінцевої точки руху T_1 дорівнює: $z_1 = H_1 - Z_0$, де Z_0 – величина зміщення розряду на першому кроці вздовж осі OZ .

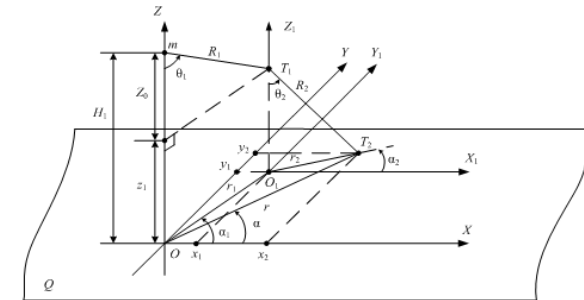


Рис. 1 – Ураження площини розрядом довгої іскри

На другому кроці розряд рухається також прямолінійно з точки T_1 в напрямку, який визначається випадковими значеннями кутів α_2 та θ_2 до ураження площини Q . Випадкові кути мають рівномірний розподіл з такими щільностями:

$$f(\theta_2) = \begin{cases} \frac{1}{\theta_{2\max}}, & \text{при } \theta_2 \in [0; \theta_{2\max}), \\ 0, & \text{при } \theta_2 \notin [0; \theta_{2\max}). \end{cases} \quad (3)$$

$$f(\alpha_2) = \begin{cases} \frac{1}{2\pi}, & \text{при } \alpha_2 \in [0; 2\pi), \\ 0, & \text{при } \alpha_2 \notin [0; 2\pi). \end{cases} \quad (4)$$

Максимальні значення кутів $\theta_{1\max}$ та $\theta_{2\max}$ в (1) та (3) вибираються з інтервалу $[0, \pi/2]$

Кінцева точка руху розряду на другому кроці T_2 має полярні координати $\varphi = \alpha_2$ та $\rho = r_2$ в системі з віссю O_1X_1 , і декартові координати в системі XYZ : $X = x_2$, $Y = y_2$, $Z = 0$.

З рисунка 1 висота z_1 та полярний радіус r_1 кінцевої точки першого кроку T_1 визначаються за співвідношеннями (в системі координат XYZ):

$$z_1 = H_1 - R_1 \cos(\theta_1), \quad (5)$$

$$r_1 = R_1 \sin(\theta_1), \quad (6)$$

Полярний радіус на другому кроці r_2 з рисунка 1 визначається як (в системі координат $X_1Y_1Z_1$):

$$r_2 = z_1 \operatorname{tg}(\theta_2), \quad (7)$$

Тоді, виходячи з того, що H_1 і R_1 фіксовані величини, а θ_1 випадкова величина розподілена за (1) та використовуючи методику наведену в [5], можемо визначити щільність розподілу z_1 і r_1 :

$$g(z_1) = \frac{1}{\theta_{1\max} \sqrt{R_1^2 - (H_1 - z_1)^2}}, \quad (8)$$

$$g(r_1) = \frac{1}{\theta_{1\max} \sqrt{R_1^2 - r_1^2}}, \quad (9)$$

Для цілей аналізу будемо рахувати, що на другому кроці висота z_1 є фіксованою, а θ_2 випадкова величина розподілена за (3). Тоді, використовуючи методику з [5], знайдемо щільність розподілу r_2 у вигляді:

$$g(r_2) = \frac{z_1}{\theta_{2\max} (z_1^2 + r_2^2)}, \quad (10)$$

Для проведення імітаційного моделювання ураження площини розрядом довгої іскри за двокроковою моделлю, була розроблена комп'ютерна програма в середовищі Excel з використанням Visual Basic for Application. Для тестування програми було проведено порівняння результатів розрахунку за аналітичними моделями з результатами імітаційного моделювання (показано на рис. 2 - рис. 4). З рис. 2 - рис. 4 видно, що результати розрахунків за аналітичними моделями (8), (9), (10), статистично співпадають з результатами чисельного імітаційного моделювання. Це дає підстави вважати, що розроблена програма адекватно описує імовірнісний характер зміни параметрів запропонованої моделі роздільно на кожному кроці.

Блок-схема програми наведена на рисунку 5. На початку роботи з програмою, користувач задає фіксовані величини та максимальні значення кутів α_1 , α_2 , θ_1 , θ_2 .

Після введення кількості імітувань розрядів, програма генерує значення випадкових величин та розраховує параметри розрядного проміжку z_1 r_1 r_2 .

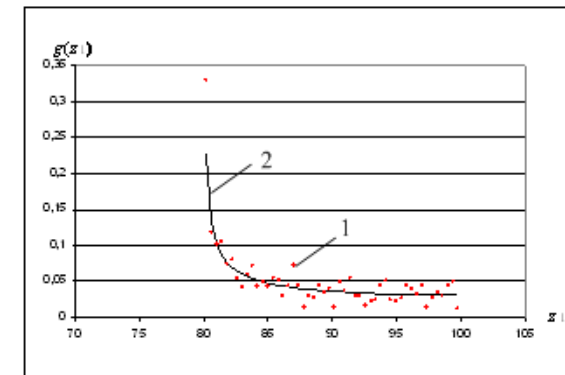


Рис. 2 – Графік щільності розподілу z_1 при $R_1 = 20$ м, $H_1 = 100$ м при $\theta_{1\max} = \frac{\pi}{2}$: 1 – чисельне імітаційне моделювання; 2 – аналітична модель

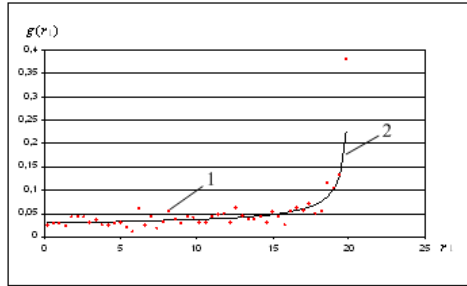


Рис. 3 – Графік щільності розподілу r_1 при $R_1 = 20$ м, $H_1 = 100$ м при $\theta_{1\max} = \frac{\pi}{2}$: 1 – чисельне імітаційне моделювання; 2 – аналітична модель

На завершальному етапі формуються данні по ураженню ділянок площини та будується графік щільності розподілу точок ураження, а також розраховується середньоквадратичне відхилення (СКВ) отриманих розрахункових даних від експериментальних.

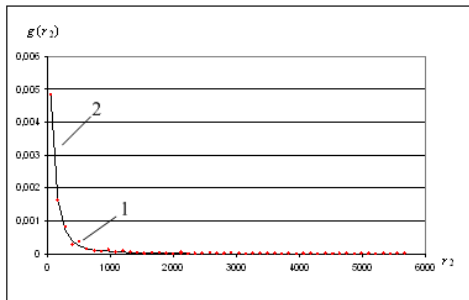


Рис. 4 – Графік щільності розподілу r_2 при $R_1 = 20$ м, $H_1 = 100$ м при $\theta_{1\max} = \frac{\pi}{2}$: 1 – чисельне імітаційне моделювання; 2 – аналітична модель

В якості експериментальних даних були використані дані по ураженню площини розрядом довгої іскри, отримані на базі високовольтного електрофізичного стенду ГН-1,2 (НДПКІ «Молнія»). При обробці експериментальних даних, була визначена щільність розподілу точок ураження в залежності від полярного радіуса r [2].

З допомогою розробленої програми була проведена серія дослідів, з метою визначення параметрів моделі при яких спостерігається мінімальне СКВ даних чисельного імітаційного моделювання від даних експерименту. Графіки залежності СКВ від $\theta_{1\max}$, $\theta_{2\max}$ та R_1 наведені на рисунку 6, 7 та 8. При обробці результатів було визначено,

що при $R_1 = 0,8$ м, $\theta_{1\max} = 10,6^\circ$, $\theta_{2\max} = 20,4^\circ$ СКВ приймає мінімальне значення.

З рисунка 1 полярний радіус точки ураження площини T_2 визначається як:

$$r = \sqrt{x_2^2 + y_2^2}, \quad (14)$$

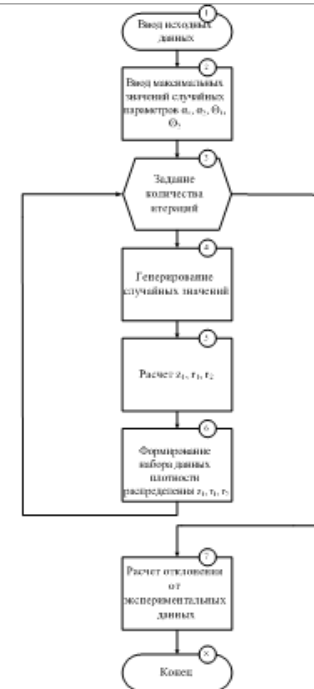


Рис. 5 – Блок - схема програми

На рисунку 9 показано порівняння щільність розподілу $g(r)$, визначених за результатами імітаційного моделювання та даними експерименту. З рисунка 9 видно, що графік, побудований за результатами імітаційного моделювання, має подібний характер до графіка за результатами експерименту. СКВ результатів імітаційного моделювання від експериментальних даних склало 15.

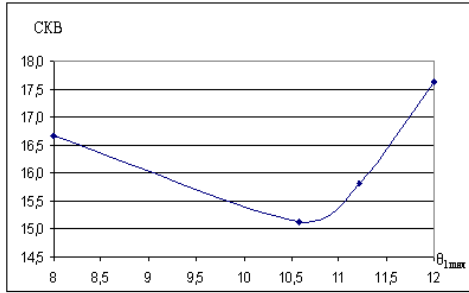


Рис. 6 – Залежність СКВ від θ_{1max} при $R_1 = 0,8$, $\theta_{2max} = 20,4^\circ$

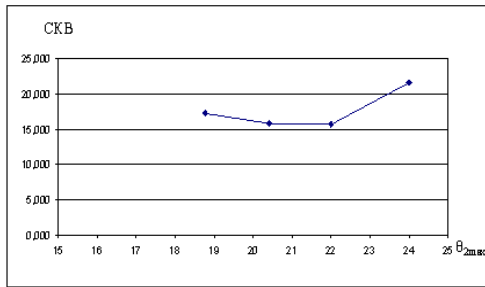


Рис. 7 – Залежність СКВ від θ_{2max} при $R_1 = 0,8$, $\theta_{1max} = 10,6^\circ$

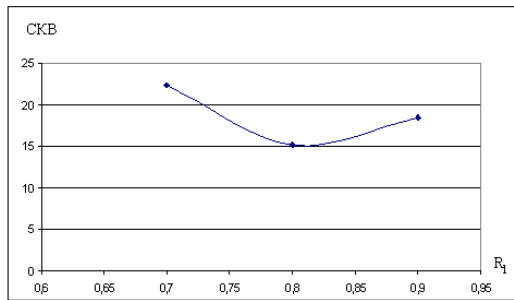


Рис. 8 – Залежність СКВ від R_1 при $\theta_{1max} = 10,6^\circ$, $\theta_{2max} = 20,4^\circ$

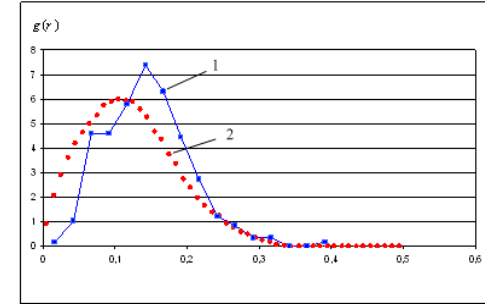


Рис. 9 – Графіки щільності розподілу r : 1 – за результатами експерименту; 2 – за результатами чисельного імітаційного моделювання

Висновки:

1. Запропонована імітаційна двокрокова модель ураження площини розрядом довгої іскри.
2. Розроблена комп'ютерна програма для чисельного імітаційного моделювання.
3. Визначені параметри імітаційної моделі при яких середньоквадратичне відхилення даних чисельного імітаційного моделювання від даних експерименту мінімальне та не перевищує 15.

Матеріали статті будуть використані при подальшій розробці імітаційних моделей ураження довгою іскрою різних об'єктів.

Список джерел інформації: 1. Волкова О.В. Поражаемость искровым разрядом стержня на плоскости / О.В. Волкова, А.П. Корявин // Электричество. – 1991. – №5. – С. 52 – 55. 2. Колушко Г.М. Экспериментальное исследование поражения плоскости длинной искрой / Г.М. Колушко, П.Н. Мельников, О.С. Недельский, А.А. Петков, С.С. Руденко, А.Ю. Чернухин // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка та електрофізика високих напруг. – X. : НТУ "ХПІ". – 2012. – №21. – С. 146 – 153. 3. Баранов М.И. Экспериментальные исследования поражения заземленной плоскости и размещенных на ней объектов электрическим разрядом в длинном промежутке / М.И. Баранов, В.И. Доценко, В.М. Зиньковский, Г.М. Колушко, О.С. Недельский, А.А. Петков, Е.Г. Понуждаева, С.С. Руденко, В.Л. Цехмистро // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка та електрофізика високих напруг. – X. : НТУ "ХПІ". – 2013. – №27. – С. 11 – 20. 4. Колушко Д.Г. Статистическая модель поражения одиночного стержня разрядом молнии / Д.Г. Колушко, А.А. Петков // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка і електрофізика високих напруг. – X. : НТУ "ХПІ". – 2011. – №49. – С. 103 – 107. 5. Венцель Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Венцель. – М. : «Наука», 1969. – 576 с.

Bibliography (transliterated): 1. Volkova O.V. Korjavin A.R. Porazhaemost' iskrovym razrjadom sterzhnja na ploskosti. Jelektrichestvo. 1991. No 5. 52 – 55 Print. 2. Koliushko G.M. P.N. Mel'nikov, O.S. Nedzel'skij, A.A. Petkov, S.S. Rudenko, A.Ju. Jeksperimental'noe issledovanie porazhenija ploskosti dlinnoj iskroj *Visnik Nacional'nogo tehničnogo universitetu "Harkivs'kij politehničnij institut". Zbirnik naukovih prac'. Tematičnij vipusk: Tehnika ta elektrofizika visokih naprug.* 2012. No 21. 146 – 153. Print 3. Baranov M.I. Docenko V.I., Zin'kovskij V.M., Koliushko G.M., Nedzel'skij O.S., Petkov A.A., Ponuzhdaeva E.G., Rudenko S.S., Cehmistro V.L. Jeksperimental'nye issledovanija porazhenija zazemlennoj ploskosti i razmeshennyh na nej ob'ektov jelektricheskim razrjadom v dlinnom promezhutke. *Visnik Nacional'nogo tehničnogo universitetu "Harkivs'kij politehničnij institut". Zbirnik naukovih prac'. Tematičnij vipusk: Tehnika ta elektrofizika visokih naprug.* 2013. No 27. 11 – 20. Print 4. Koliushko D.G., Petkov A.A. Statisticheskaja model' porazhenija odinochnogo sterzhnja razrjadom molnii *Visnik Nacional'nogo tehničnogo universitetu "Harkivs'kij politehničnij institut". Zbirnik naukovih prac'. Tematičnij vipusk: Tehnika i elektrofizika visokih naprug.* 2011. No 49. 103 – 107. Print 5. Ventcel' E.S. Teorija verojatnostej. Moscow : «Nauka», 1969.

Надійшла (received) 05.02.2012

УДК 621.311

О.П. ЛАЗУРЕНКО, канд. техн. наук, проф. НТУ «ХПІ»;
Г.І. ЧЕРКАШИНА, ст. викл. НТУ «ХПІ»

ЩОДО ВИЗНАЧЕННЯ ВАРТОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ПОБУТОВИХ СПОЖИВАЧІВ

У роботі розглянутий механізм формування тарифу на електричну енергію для побутових споживачів, виявлені фактори, які безпосередньо впливають на розмір тарифу, наведені дані по споживанню електричної енергії мешканцями 9-типоверхового житлового будинку, визначено тариф на електричну енергію для споживачів 9-ти поверхового житлового будинку та обсяг дотацій.

Ключові слова: побутовий споживач електричної енергії, роздрібний тариф на електричну енергію, нормативні технологічні втрати, змінні розрахункові втрати, умовно постійні втрати.

Вступ. Тариф для побутових споживачів на електричну енергію (ЕЕ) є дотаційним та складає 0,2802 грн/кВт-год для помешкань, обладнаних газовими приладами, та 0,2154 грн/кВт-год – електричними плитами [1]. Суттєва невідповідність тарифу економічно обґрунтованому рівню призвела до його диференціації за обсягом споживання, а саме, за умови споживання електричної енергії більше 150 кВт-год/місяць тариф на ЕЕ складає 0,3648 грн/кВт-год, більше 800 кВт-год/місяць – 0,9576 грн/кВт-год. Для помешкань, обладнаних електричними плитами, місячне споживання ЕЕ більше 250 кВт-год – 0,2802 грн/кВт-год, більше 800 кВт-год/місяць – 0,9576 грн/кВт-год [1, 2].

Диференціація тарифу за обсягом споживання не вирішила питання відповідності останнього економічно обґрунтованому рівню і, як наслідок, на сьогодні знов піднімається питання збільшення тарифу на електричну енергію для населення.

Виходячи з вищенаведеного метою роботи є визначення реальної вартості ЕЕ для населення.

Для досягнення мети у роботі були вирішені наступні завдання:

- 1) Розглянутий механізм формування тарифу на ЕЕ для побутових споживачів
- 2) Виявлені фактори, які безпосередньо впливають на тариф;
- 3) Отримані дані по споживанню ЕЕ на вводі 9-ти поверхового житлового будинку;

© О.П. Лазуренко, Г.І. Черкашина, 2014