

УДК 621.311.1: 621.316.37

П. Г. ПЛЄШКОВ, А. І. КОТИШ, О. І. СІРІКОВ

РОЗРОБКА ФІКСАТОРА КОРОТКИХ ЗАМИКАНЬ ДЛЯ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ НАПРУГОЮ 110 – 150 кВ

Запропонована проста конструкція електромеханічного фіксатора короткого замикання для повітряних ліній електропередач напругою 110-150 кВ. Для обраної конструкції наведена методика розрахунку його технічних характеристик. Експериментально доведена на дослідному зразку придатність запропонованої методики для інженерних розрахунків.

Ключові слова: повітряна лінія електропередач, фіксатор коротких замикань, електрична мережа з відгалуженнями.

Вступ. Під час експлуатації електричних мереж, в наслідок дії різних за характером причин, неминуче відбуваються їх пошкодження, що призводить до коротких замкнень та аварійних відключень. Перериви в електропостачанні наносять матеріальні збитки, як енергопостачальним організаціям, за рахунок недовідпуску електроенергії, так і споживачам, за рахунок не випущеної продукції. Зі збільшенням класу напруги кількість недовідпущеної електроенергії та збиток при перериві електропостачання збільшується. Найбільш слабкою ланкою в електричних мережах залишаються повітряні лінії електропередач (ПЛЕ). Час перериву електропостачання напряму залежить від часу пошуку місця пошкодження ПЛЕ, для зменшення якого слугують різні пристрої [1, 2, 3, 6]. Принцип роботи більшості цих пристроїв заснований на реєстрації параметрів аварійного режиму, що дозволяє визначити приблизну відстань до місця пошкодження. Недоліком такого класу пристроїв є те, що вони не дозволяють визначити місце пошкодження в електричних мережах з глухими відгалуженнями та мають велику вартість, а це в свою чергу стримує їх широке застосування. Для розгалужених електричних мереж розроблений ряд пристроїв – фіксаторів або індикаторів коротких замкнень [4, 5], які встановлюються на проводах в місці відгалуження ПЛЕ, що полегшує пошук місця пошкодження оперативній виїзній бригаді. Більшість цих пристроїв орієнтовані на клас напруг 10-35 кВ, як найбільш масових та таких де глухі відгалуження зустрічаються частіше, а електричні мережі з класами напруг 110-150 кВ залишаються практично без уваги.

Отже, розробка простого та надійного фіксатора коротких замкнень для ПЛЕ напругою 110-150 кВ залишається актуальною задачею. Робота проведена в рамках госпдоговірної теми №0113U003621 "Розробка фіксатора коротких замкнень для електричної мережі 150 кВ" з ПАТ Кіровоградобленерго.

Основна частина. Існує декілька відомих конструктивних рішень фіксаторів короткого замкнення (ФКЗ). В основному вони діють на індукційному принципі вимірювання струму, який полягає в тому, що на деякій відстані від проводу розміщується індукційний датчик у вигляді котушки з осердям. ЕРС, яка наводиться в котушці електричною схемою перетворюється у вихідний сигнал потрібної величини. Наявність в цих показниках к.з. електронних схем знижує їх надійність, враховуючи

тяжкі атмосферні умови, в яких вони працюють. Тому для вирішення поставленої задачі, зроблена спроба піти по шляху використання простого електромеханічного ФКЗ, в якому електричним елементом є тільки сам провід ПЛЕ [7].

Інформаційним елементом є циферблат з нанесеними на ньому цифрами і вказівною стрілкою (рис. 1, а). Зручність і простота настройки пристрою досягається плавним регулюванням струму спрацьовування простим натягінням зворотної пружини. Крім того регулювання струму спрацьовування можливо проводити і ступінчасто, шляхом зміни кількості кріпильних дужок (рис. 1, б).



Рис. 1 – Фіксатор короткого замкнення: а – циферблат; б – зовнішня частина магнітної системи

Працює ФКЗ наступним чином. При проходженні струму по проводу, навколо останнього утворюється магнітне поле, величина якого, залежить від величини струму. При досягненні магнітним потоком величини достатньої для притягування якоря електромагніту, останній притягується, тягнучи за собою храповий механізм (рис. 2).

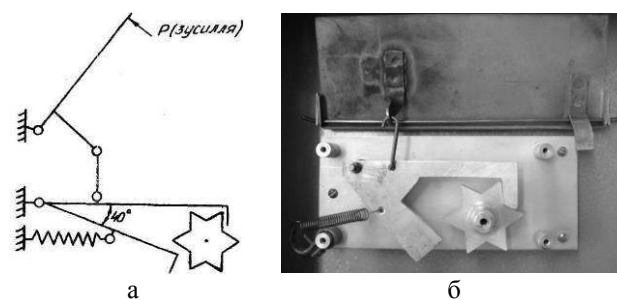


Рис. 2 – Обліковий механізм ФКЗ: а – кінематична схема; б – зовнішній вигляд

Храповик повертається навколо своєї вісі і своїм

© П. Г. Плєшков, А. І. Котиш, О. І. Сіріков, 2015

важелем повертає "зірочку" до її упора зубцем в храповик. В цьому положенні механізм фіксатора залишається поки по проводу протікає струм к.з. Після спрацювання релейного захисту і відключення пошкодженої лінії струм припиняється і ярк електромагнітна під дією пружини повертається в початкове положення. При цьому храповик своїм другим важелем підіжме "зірочку" до упора зубцем в цей важіль. Тобто "зірочка", а значить і стрілка, повернуться на кут 60° вперед і зафіксуються в цьому положенні, при цьому відбудеться відлік на наступну одиницю.

При розрахунках магнітної системи ФКЗ замкненням магнітного потоку навколо проводу по повітрю, впливом притискного механізму проводу на розподіл магнітного поля та потоками розсіювання знехтувана. Отже, можна вважати, що весь магнітний потік, який створюється проводом замикається по магнітній системі.

Поставлену задачу розрахунку магнітної системи ФКЗ, при зроблених припущеннях, можна звести до класичної задачі розрахунку електромагніту клапанного типу.

Схема електромагнітного механізму ФКЗ представлена на рис. 3.

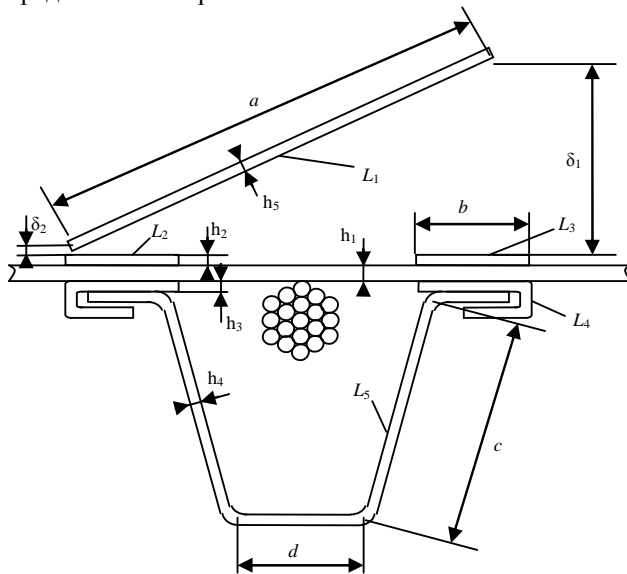


Рис. 3 – Схема електромагнітного механізму ФКЗ

Намагнічуюча сила, що створюється проводом може бути визначена за формулою

$$I\omega = I \cdot N, \quad (1)$$

де I – струм, що протікає по проводу;

N – кількість витків проводу, що охоплюється магнітною системою.

Враховуючи, що ФКЗ конструктивно не передбачає створення декількох витків проводу ($N=1$), то намагнічуюча сила чисельно дорівнює струму, що протікає по проводу $I\omega = I$.

Використовуючи метод Ротерса, розбиваємо весь магнітний потік на прості геометричні фігури. Схема повітряного зазору представлена на рис. 4.

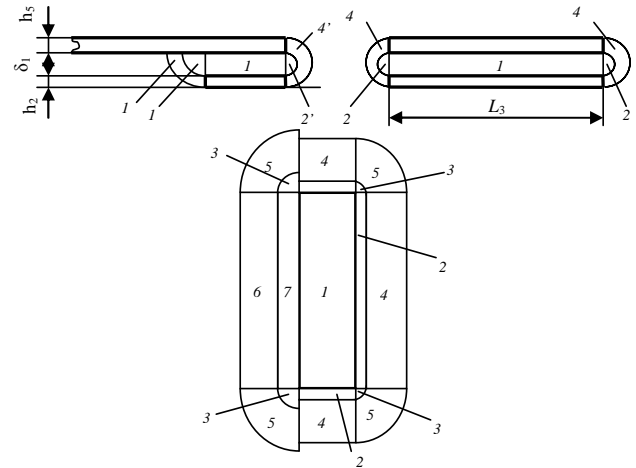


Рис. 4 – Магнітне поле між ярком і пластиною:
1 – прямокутний паралелепіпед розмірами $b \cdot L_3 \cdot \delta_1$;
2 – половина циліндра довжиною b і діаметром δ_1 ;
2' – половина циліндра довжиною L_3 і діаметром δ_1 ;
3 – чверть кулі діаметром $2 \cdot \delta_1$; 3' – чверть кулі діаметром δ_1 ;
4 – половина порожнього циліндру довжиною b , внутрішній діаметр δ_1 , зовнішній діаметр $\delta_1 + 2 \cdot h_2$; 4' – половина порожнього циліндру довжиною L_3 , внутрішній діаметр δ_1 , зовнішній діаметр $\delta_1 + 2 \cdot h_2$; 5 – чверть кульової оболонки діаметром $\delta_1 + 2 \cdot h_2$; 5' – чверть кульової оболонки діаметром $2 \cdot (\delta_1 + 2 \cdot h_2)$; 6 – чверть порожнього циліндра довжиною L_3 із внутрішнім радіусом δ_1 , зовнішнім $\delta_1 + h_2$;
7 – чверть циліндра довжиною L_3 і радіусом δ_1 .

Магнітні провідності знайдемо за наступними формулами:

$$G_1 = \mu_0 b \cdot L_3 / \delta_1, \quad (2)$$

$$G_2 = 0,26 \cdot \mu_0 \cdot b, \quad G'_2 = 0,26 \cdot \mu_0 \cdot L_3 \quad (3)$$

$$G_3 = 0,077 \cdot \mu_0 \cdot \delta_1, \quad G'_3 = 0,154 \cdot \mu_0 \cdot \delta_1 \quad (4)$$

$$G_4 = \mu_0 \frac{2 \cdot b}{\pi \cdot (\delta_1 / h_2 + 1)}, \quad G'_4 = \mu_0 \frac{2 \cdot L_3}{\pi \cdot (\delta_1 / h_2 + 1)} \quad (5)$$

$$G_5 = G'_5 = \mu_0 h_2 / 4 \quad (6)$$

$$G_6 = \mu_0 \frac{2 \cdot L_3}{\pi \cdot (\delta_1 / h_2 + 0,5)} \quad (7)$$

$$G_7 = 0,52 \cdot \mu_0 \cdot L_3 \quad (8)$$

$$G_{\delta 1} = G_1 + 2G_2 + G_{2'} + 2G_3 + 2G_{3'} + 2G_4 + G_{4'} + 4G_5 + G_6 + G_7 \quad (9)$$

Магнітну провідність неробочого зазору визначимо за формулою:

$$G_{\delta 2} = \mu_0 \frac{b \cdot L_2}{\delta_2} \quad (10)$$

Магнітну провідність переходу крізь корпус ФКЗ визначимо за формулою:

$$G_{\delta 3} = \mu_0 \frac{b \cdot L_2}{h_1} \quad (11)$$

Враховуючи, що таких переходів два, то сумарна магнітна провідність визначиться за формулою:

$$G_{\delta 3\Sigma} = G_{\delta 3} / 2 \quad (12)$$

Порядок побудови вебер-амперної характеристики магнітного кола наступний:

1 Визначають площу перерізу скоби $S_{ск} = h_4 \cdot L_5$.

2 Знаходять довжину ділянки.

3 Задаються декількома значеннями магнітної індукції B у найменшому перерізі.

4 За основними кривими намагнічування для всіх обраних значень індукції $B_{скі}$ знаходять напруженість магнітного поля $H_{скі}$ і падіння магнітного потенціалу на ділянці скоби:

$$F_{скі} = H_{скі} \cdot X, \quad (13)$$

де $X = 2 \cdot c + d$ – довжина осьової лінії скоби (рис. 3).

5. Визначають магнітний потік в пластинах, що закріплюють (такий же потік буде й у скобі, оскільки потік на всій ділянці постійний). Для всіх обраних значень індукції

$$\Phi_i = \Phi_{плі} = \Phi_{скі} = B_{скі} \cdot S_{ск}. \quad (14)$$

6. Знаходять магнітну індукцію у пластинах, що закріплюють для всіх отриманих значень потоку

$$B_{плі} = \Phi_i / S_{плі}, \quad (15)$$

де $S_{пл} = b \cdot L_3$ – площа поверхневих пластин, що закріплюють.

7. За основною кривою намагнічування для всіх отриманих значень $B_{плі}$ знаходять напруженість магнітного поля $H_{плі}$ і падіння магнітного потенціалу на ділянці пластин, що закріплюють

$$F_{плі} = H_{плі} \cdot X, \quad (16)$$

де $X = 2(h_2 + h_3)$ – товщина пластин, що прижимають (рис. 3).

8. Падіння магнітного потенціалу

$$F_{лі} = F_{плі} + F_{скі}, \quad (17)$$

Магнітна провідність неробочого повітряного зазору вважається незмінною при всіх положеннях якоря. У цьому випадку можна побудувати результуючу вебер-амперну характеристику для якоря і неробочого повітряного зазору:

1. Знаходимо магнітну індукцію у якорі для всіх отриманих значень потоку

$$B_{я} = \Phi_i / S_{я}, \quad (18)$$

де $S_{я} = h_5 \cdot L_1$ – площа якоря.

2. За основною кривою намагнічування для всіх отриманих значень $B_{я}$ знаходять напруженість магнітного поля $H_{я}$ і падіння магнітного потенціалу на ділянці якоря

$$F_{я} = H_{я} \cdot X, \quad (19)$$

де $X = a$ – товщина пластин, що прижимають (рис. 3).

3. Падіння магнітного потенціалу в неробочому повітряному зазорі для різних значень потоків визначаємо за формулою

$$F_{\delta 2} = \Phi_i / G_{\delta 2} \quad (20)$$

4. Падіння магнітного потенціалу в переході крізь корпус ФКЗ для різних значень потоків визначаємо за формулою

$$F_{\delta 3} = \Phi_i / G_{\delta 3 \Sigma} \quad (21)$$

5. Падіння магнітного потенціалу

$$F_{2i} = F_{я} + F_{\delta 2} + F_{\delta 3}. \quad (22)$$

Електромагнітну силу в робочому повітряному зазорі визначимо за формулою:

$$F_m = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Phi_i^2}{\mu_0 \cdot S} \quad (23)$$

де Φ_i – реальний магнітний потік на i -тій ділянці;
 S – площа перетину робочого магнітного зазору.

Сумарне падіння магнітного потенціалу визначаємо за формулою:

$$F_{сумі} = F_{лі} + F_{2i}. \quad (24)$$

Вирішуючи графічно рівняння

$$F_{\delta} = I\omega - F_{сумі}, \quad (25)$$

будуємо вебер-амперну характеристику робочого повітряного зазору $\Phi = f(F_{\delta})$.

Падіння магнітного потенціалу в робочому зазорі для різних значень потоків визначаємо за формулою

$$F_{\delta 1} = \Phi_0 / G_{\delta 1 \Sigma}. \quad (26)$$

Задаємося значенням магнітного потоку Φ_0 і знаходимо падіння магнітних потенціалів у робочому повітряному зазорі при магнітному потоці, рівному Φ_0 . Через отримані точки і початок координат проводимо прямі до перетинання із кривою $\Phi = f(F_{\delta})$. Опускаючи із точок перетинання перпендикуляри на вісь ординат, отримуємо реальне значення магнітного потоку у робочому повітряному зазорі при відповідних значеннях зазору. Розрахунок тягового зусилля, що діє на якір проводимо за формулою (23).

Графік залежності тягового зусилля від величини робочого магнітного зазору побудований за наведеною вище методикою для дослідного зразка представлений на рис. 5.

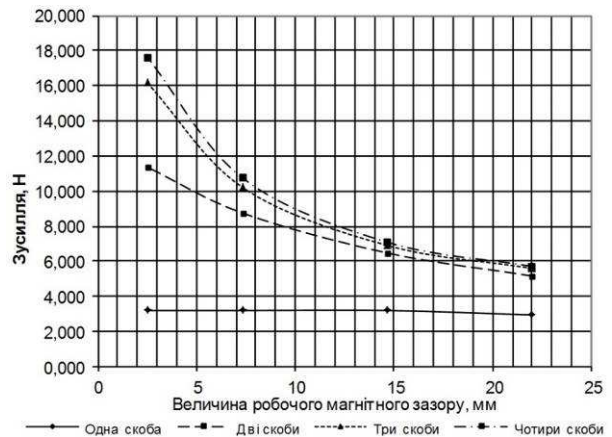


Рис. 5 – Тягова характеристика дослідного зразка ФКЗ при струмі 1000 А

Суть експериментальних досліджень полягає у визначенні порогів спрацьовування пристрою в функції струму та часу в залежності від кількості кріпильних дужок. Роботи проводилися на лабораторному релейному стенді призначеному для перевірки, зняття характеристик і настроювання на задані параметри різних пристроїв релейного захисту, автоматики, електричних апаратів. Для створення магнітного потоку еквівалентного за дією до дії проводу зі струмами к.з. величиною до 3000 А використана котушка індуктивності з магнітним екраном рис. 6.

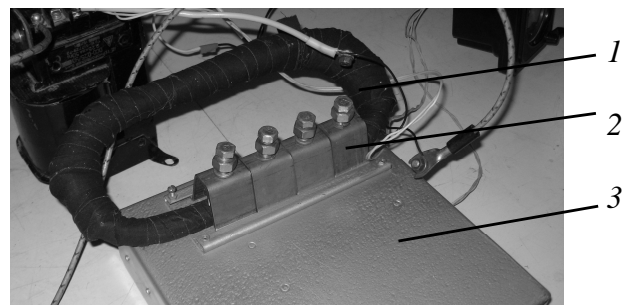


Рис. 6 – Кріплення котушки до пристрою ФКЗ: 1 – котушка індуктивності, 2 – кріпильні дужки, 3 – корпус пристрою

Перший цикл дослідів дозволив отримати залежність струму спрацювання $I_{\text{спр}}$ від кількості дужок (скоб), розміщених на пристрої. Результати зведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Результати експериментального дослідження струму спрацювання ФКЗ

№ досліду	4 скоби	3 скоби	2 скоби	1 скоба
Струм, А				
1	945	1025	1200	1625
2	937,5	1037,5	1200	1600
3	937,5	1012,5	1212,5	1625
Середнє	940	1025	1204	1617

Необхідність проведення другого циклу дослідів викликана потребою побудови часо-струмової характеристики ФКЗ. За результатами дослідження визначено, що максимальний час спрацювання 0,13 с (4 скоби, 950 А), який менший за час спрацювання релейного захисту (0,2 с), а отже ФКЗ спрацює раніше ніж релейний захист відключить струм в ПЛЕ.

Висновки. Підсумовуючи вище зазначене можливо зробити наступні висновки:

1. Зменшити час пошуку місця пошкодження ПЛЕ з глухими відгалуженнями можливо шляхом використання пристроїв ФКЗ, що встановлюються безпосередньо в місці відгалуження.

2. Аналіз існуючих пристроїв ФКЗ для ПЛЕ дозволяє стверджувати, що більшість з них орієнтована на клас напруги 10-35 кВ, в той же час пристрої для напруги 110-150 кВ практично відсутні.

3. Запропонована проста конструкція електро-механічного ФКЗ для класу напруг 110-150 кВ.

4. Розроблена методика розрахунку технічних характеристик ФКЗ для запропонованої конструкції.

5. Проведене експериментальне дослідження дослідного зразка ФКЗ, яке довело придатність запропонованої методики для інженерних розрахунків.

Список літератури: 1. Айзенфельд А.И. Методические указания по определению мест повреждения воздушных линий напряжением 110 кВ и выше с помощью фиксирующих приборов. – М.: Союзтехэнерго, 1989. – 62 с. 2. Айзенфельд А.И., Шалыт Г.М. Определение мест короткого замыкания на линиях с ответвлениями. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 208с. 3. Резниченко Т.П., Олексієнко Б.І. Визначення відстані до місця пошкодження на ЛЕП-110 кВ за методом параметрів аварійного режиму // Енергетика і автоматика. – 2013. – №3. – С. 169-175. 4. Horstmann Navigator - индикаторы короткого замыкания (ИКЗ) воздушных линий: [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://iron-harry.ua/tovar/1/5/63/> (дата звернення: 02.10.2015). – Назва з екрану. 5. Регистраторы короткого замыкания распределительной ВЛЭП напряжением до 35 кВ ASTROHN-8070, ASTROHN-8080: [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.astrohn.ru/instrument/KZ.html> (дата звернення: 02.10.2015). – Назва з екрану. 6. Устройство для определения места повреждения на линиях электропередачи напряжением 6-35 кВ, 110-750 кВ ИМФ-1Р и ИМФ-3Р: [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://pek.by/imf-1r/> (дата звернення: 02.10.2015). – Назва з екрану. 7. Пleshkov П.Г. Орлович А.Ю., Котыш А.І. Фиксатор короткого замыкания // 36. наук. прачь Кировградского институту сільськогосподарського машинобудування. – 1997 – С. 42-45.

Bibliography (transliterated): 1. Ajzenfeld A.I. Metodicheskie ukazaniya po opredeleniju mest povrezhdenija vozdushnyh linij na prjazheniem 110 kV i vyshe spomoshh'ju fiksirujushhijh priborov. – Moscow: Sojuztehenergo, 1989. 62 p. Print. 2. Ajzenfeld A.I., Shalyt G.M. Opredelenie mest korotkogo zamykanija nalinijah s otvetvlenijami. – Moscow: Energoatomizdat, 1988. 208 p. Print. 3. Reznichenko T.P., Oleksiyenko B.I. Vyznachennya vidstani do misca poshkodzhennya na LEP-110 kV za metodom parametrv avarijnogo rezhymu. Energety'ka i avtomaty'ka. 2013. No 3. 169-175. Print. 4. Horstmann Navigator – indicatory korotkogo zamykanija (IKZ) vozdushnyh linij: [Elektronnyj resurs]. Rezhym dostupu: <http://iron-harry.ua/tovar/1/5/63/> (data zvernennya: 02.10.2015). Nazva z ekranu. 5. Registratory korotkogo zamykanija raspreditel'noj VLEP na prjazheniem do 35 kV ASTROHN-8070, ASTROHN-8080: [Elektronnyj resurs]. Rezhym dostupu: <http://www.astrohn.ru/instrument/KZ.html> (data zvernennya: 02.10.2015). Nazva z ekranu. 6. Ustrojstvo dlja opredelenija mesta povrezhdenija na linijah elektroperedachi naprjazheniem 6-35 kV, 110-750 kV IMF-1R i IMF-3R: [Elektronnyj resurs]. Rezhym dostupu: <http://pek.by/imf-1r/> (data zvernennya: 02.10.2015). Nazva z ekranu. 7. Plyeshkov P.G. Orlovy'ch A.Yu., Koty'sh A.I. Fiksator korotkogo zamykannya. Zb. nauk. pracz Kirovograd'skogo institutu silskogospodarskogo mashynobuduvannya. 1997. 42-45. Print.

Надійшла (received) 08.10.2015



Пleshkov Петро Григорович – кандидат технічних наук, професор, Кіровоградський національний технічний університет, завідувач кафедри "Електротехнічних систем та енергетичного менеджменту", тел.: (0522) 39-04-61.

Plyeshkov Petro Hryhorovych – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Full Professor, Kirovohrad, National Technical University, Head at the Department of "Electrical systems and energy management", tel.: (0522) 39-04-61.



Котыш Андрій Іванович – кандидат технічних наук, доцент, Кіровоградський національний технічний університет, заступник завідувача кафедри "Електротехнічних систем та енергетичного менеджменту", тел.: (0522) 39-04-61.

Kotysh Andrey Ivanovich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Kirovohrad, National Technical University, Vice Head at the Department of "Electrical systems and energy management", tel.: (0522) 39-04-61.



Сіріков Олександр Іванович – кандидат технічних наук, доцент, Кіровоградський національний технічний університет, доцент кафедри "Електротехнічних систем та енергетичного менеджменту", тел.: (0522) 39-04-61; e-mail: asirikov@i.ua

Sirikov Aleksandr Ivanovich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Kirovohrad, National Technical University, Associate Professor at the Department of "Electrical systems and energy management", tel.: (0522) 39-04-61; e-mail: asirikov@i.ua