

## РЕЛЕЙНИЙ МІКРОПРОЦЕСОРНИЙ ЗАХИСТ СИСТЕМИ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ, ОСНОВАНИЙ НА НОВІЙ ОЗНАЦІ.

### 1. ТЕОРІЯ РОБОТИ

У статті запропоновано нову ознаку визначення аварійного режиму системи тягового електропостачання постійного струму, а саме, швидкість спадання наруги фідера тягової підстанції. Дана ознака дозволяє визначати вид короткого замикання. Крім того, запропоновано схемні рішення реалізації системи захисту, основані на цій ознаці.

*Ключові слова:* коротке замикання, напруга фідера, швидкість зміни напруги

В статье предложен новый признак определения аварийного режима системы тягового электроснабжения постоянного тока, а именно, скорость уменьшения напряжения фидера тяговой подстанции. Рассмотренный признак позволяет определять вид короткого замыкания. Кроме того, предложены схемные решения реализации системы защиты, основанные на этом признаке.

*Ключевые слова:* короткое замыкание, напряжение фидера; скорость изменения напряжения

In the article a new indication of emergency conditions detection for the traction DC power supply system, namely the rate of decreasing the traction substation feeder voltage is suggested. The indication considered allows determining a kind of short circuit. In addition, the circuit design decisions for realization of the protection system based on this indication are proposed.

*Keywords:* short circuit, feeder voltage, rate of changing voltage

Як відомо [1 – 4], всі існуючі види захисту електротехнічних пристроїв системи електричної тяги основані на певних ознаках, а саме на порівнянні значень цих ознак при нормальному та аварійному режимах роботи пристроїв чи систем. В системах релейного захисту тягового електропостачання такими ознаками є: максимальний струм фідера; кидки струмів; крутизна

фронту зростання струму фідера  $\left( \frac{di_{\Phi}}{dt} \Big|_{t=0} \right)$ ; рі-

вень напруги в різних точках тягової мережі, стала часу тощо [1 – 4]. Це й обумовило наявність струмових видів захисту (максимальної струмової, струмової відсічки, максимальної імпульсної струмової), захисту мінімальної напруги (вольтметрового блокування, потенціальної); захисту за опором; захисту, що реагує на перехідні процеси (по швидкості зростання фідерного струму чи його стрибок (приріст)).

Однак порівнюючи основні ознаки, на яких базуються вищезазначені види захисту, можна зробити наступні висновки [2, 4]. При значних відстанях між підстанціями струми віддаленого короткого замикання (малі струми) близькі за значенням з максимальними струмами навантаження нормального режиму, а інколи і менше них. У більшості випадків при великій інтенсивності руху потягів струми пошкодження, що виникли на відстані 8...12 км від тягової підстанції, практично вже не можна відрізнити від максимального навантаження. По крутизні фронту зростання струму і сталої часу кола та-

кож не можна напевно визначати режим тягової мережі, оскільки в нормальних умовах і при короткому замиканні у багатьох випадках вони майже однакові. Кидки струму при короткому замиканні, як правило, вище ніж в нормальному режимі. Виняток складає режим зняття живлення (якщо  $t_{пер} > 0,5$  с) з повторним відновленням напруги, але такий режим є частим у практиці експлуатації. Потенціальний захист також має недоліки – необхідність побудови спеціальної провідної лінії для кожної пари блокуючих вимикачів реле мінімальної напруги, що встановлюються в різних необхідних точках тягової мережі. Зазначені недоліки ознак, а значить і власне систем захисту зобов'язують спеціалістів-електротехніків працювати над пошуком інших ознак (принципів) побудови релейного захисту.

Як відомо, при короткому замиканні в тяговій мережі її напруга знижується. Найбільш різке, практично лінійне, її зменшення спостерігається, по-перше, в перший момент часу аварійного перехідного процесу, і по-друге, в місці короткого замикання (до нуля при металічному короткому замиканні) і в точках поблизу нього (рис. 1 – 3). Тому ознакою, на якій може бути побудовано захист, на нашу думку, є крутизна фронту такого зменшення фідерної на-

пруги  $\frac{du_{\Phi}}{dt} \Big|_{t=0}$ . Швидкість  $\frac{du_{\Phi}}{dt}$  різна в залежності від відстані місця короткого замикання до фідера з розглядуваним  $u_{\Phi}$ .

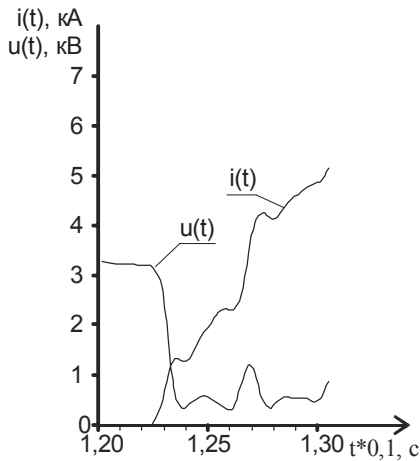


Рис. 1. Осцилограма відключення подвійним вимикачем 2xВAB-43 близького короткого замикання

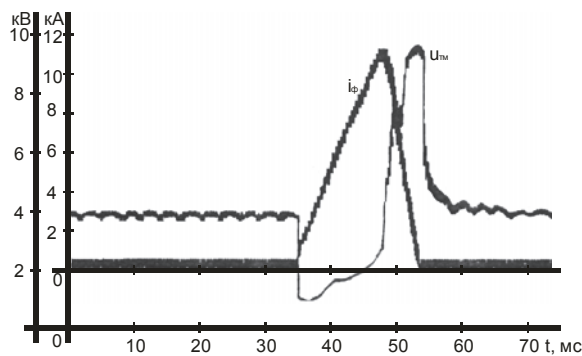


Рис. 2. Осцилограма відключення подвійним вимикачем 2xВAB-49 глухого короткого замикання з усталеним струмом 27 кА на виході тягової підстанції «Істок» (за даними ОАО «УЕТМ») [5]

З метою теоретичного обґрунтування можливості використання крутизни фронту  $\left. \frac{du_{\Phi}}{dt} \right|_{t=0}$  для створення захисту ввімкнено між

фідером та рейкою вітку  $R_d C$  (яку назвемо «віткою захисту») (рис. 4).

До моменту короткого замикання струм  $i_3(t)$  в цій вітці не протікав внаслідок того, що фідерна напруга  $u_{\Phi}$  є постійною (вважатимемо ідеально випрямленою), рівною деякому початковому значенню  $U_{\Phi H}$ . В момент початку короткого замикання напруга  $u_{\Phi}$  починає з точки «н» лінійно зменшуватися (рис. 5), нехай до деякого значення  $U_{\Phi K}$ , до точки «к». Сумістимо точку «н» з початком відліку часу «0», тобто, з моменту виникнення і подальшого протікання перехідного процесу зменшення фідерної напруги  $u_{\Phi}(t)$ .

Під дією змінної (зменшення) напруги  $u_{\Phi}(t)$ , прикладеної до «вітки захисту», в останній починає протікати струм  $i_3(t)$ . Визна-

чимо його за допомогою інтеграла Дюамеля [7], згідно якого можна записати:

$$i_3(t) = \int_0^t \frac{du_{\Phi}}{dt} G(t-\tau) d\tau, \quad (1)$$

де  $G(t)$  – перехідна провідність простого  $R_d C$ -кола, утворена «віткою захисту» (рис. 4). Ця провідність дорівнює шуканому перехідному струму  $i_3^1(t)$  кола рис. 4 при її включенні на одиничну напругу. Згідно [7], для  $R_d C$ -кола вона визначається виразом

$$G(t) = i_3^1(t) = \frac{1}{R_d} e^{-\frac{t}{T_3}}, \quad (2)$$

де  $T_3 = R_d C$  – стала часу «вітки захисту».

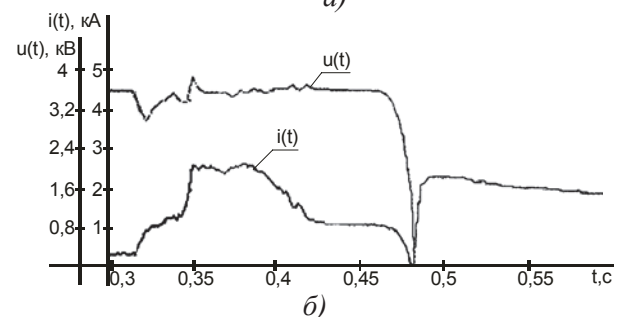
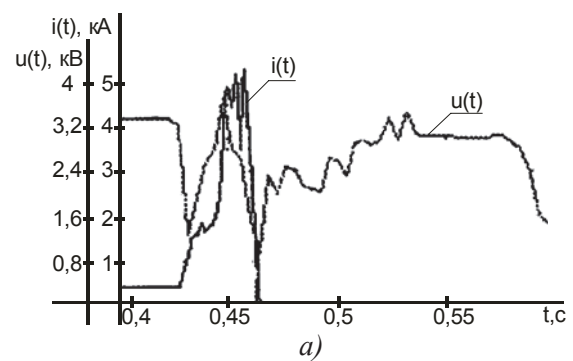


Рис. 3. Осцилограми перехідних процесів відключення ШВ Тягової підстанції з двох сторін шляху фідерної зони, коротке замикання в тяговій мережі: а) відключення ШВ фідера 2 тягової підстанції «Ховріно»; б) відключення ШВ фідера 4 тягової підстанції «Останкіно» [6]

Тоді підставимо (2) в (1), для моментів часу перехідного процесу  $0 \leq t < t_{\Phi}$  (рис. 5) величину струму  $i_3(t)$  можна записати

$$i_3(t) = \frac{1}{R_d} \int_0^t \frac{du_{\Phi}}{dt} e^{-\frac{(t-\tau)}{T_3}} d\tau. \quad (3)$$

Згідно експериментальних даних (рис. 1–3), функція  $u_{\Phi}(t)$  є лінійною

$$u_{\Phi}(\tau) = \frac{U_{\Phi K} - U_{\Phi H}}{t_{\Phi}} \tau \quad (4)$$

і тоді її похідна представляє собою деяку сталу величину

$$\frac{du_{\Phi}}{dt} = \frac{U_{\Phi K} - U_{\Phi H}}{t_{\Phi}}, \quad (5)$$

а, відповідно, цю похідну можна винести за знак інтеграла виразу (3), після інтегрування, з врахуванням формули для  $T_3$ , отримаємо

$$\begin{aligned} i_3(t) &= \frac{du_{\Phi}}{dt} \frac{1}{R_d} \int_0^t e^{-\frac{t}{T_3}} e^{\frac{\tau}{T_3}} d\tau = \frac{du_{\Phi}}{dt} \frac{1}{R_d} e^{-\frac{t}{T_3}} \left( T_3 e^{\frac{\tau}{T_3}} \right) \Big|_0^t = \\ &= \frac{du_{\Phi}}{dt} \frac{R_d C}{R_d} e^{-\frac{t}{T_3}} \left( e^{\frac{t}{T_3}} - 1 \right) = C \frac{du_{\Phi}}{dt} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_3}} \right). \quad (6) \end{aligned}$$

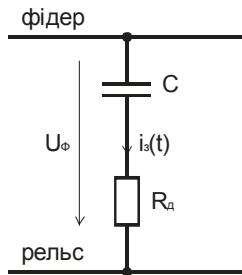


Рис. 4

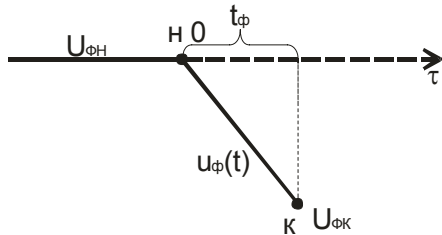


Рис. 5

Якщо стала часу  $T_3$  в (6) достатньо велика, а  $t_{\Phi}$  дуже маленька ( $e^{-\frac{t}{T_3}} \approx 1$ ), тоді:

$$i_3(t) = C \frac{du_{\Phi}}{dt} \Big|_{t=0}. \quad (7)$$

Тобто, згідно (6) та (7) струм  $i_3(t)$  у «вітці захисту», що знаходиться під дією спаду фідерної напруги при короткому замиканні, прямо пропорційна швидкості зменшення цієї напруги на початку її зміни, тобто крутизні, фронту спаду фідерної напруги.

Дамо теоретичне обґрунтування роботи ряду (в тому числі й деяких відомих [1 – 4]) принципових схем релейних пристроїв захисту, які базуються на отриманих, згідно нової ознаки, виразів (6) та (7).

Найбільш простою є схема на основі шунта з  $r_{ш}$ , представлена на рис. 6, де  $r_p$ ,  $L_p$  – активний опір та індуктивність реле.

Для неї згідно закону Кірхгофа маємо:

$$i_3 - i_{ш} - i_p = 0; \quad (8)$$

$$r_{ш} i_{ш}(t) = r_p i_p(t) + L_p \frac{di_p}{dt}. \quad (9)$$

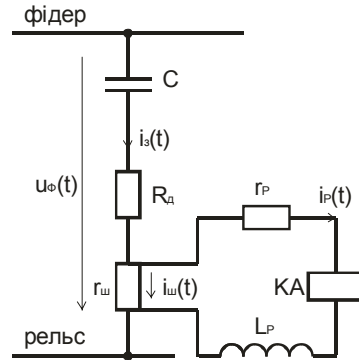


Рис. 6

Розв'язавши систему рівнянь (6), (8), (9), отримаємо:

$$i_p(t) = \frac{r_{ш} C}{r_{ш} + r_p} \frac{du_{\Phi}}{dt} \left( 1 - e^{-t/T_3} \right) - \frac{L_p / r_p}{\frac{r_{ш}}{r_p} + 1} \frac{di_p}{dt}. \quad (10)$$

Якщо підібрати реле так, щоб його стала часу  $T_p = L_p / r_p$  була настільки малою, щоб можна було знехтувати другою складовою у виразі (10), тоді для моментів часу  $0 \leq t < t_{\Phi}$  (рис. 5) отримаємо:

$$i_p(t) = \frac{r_{ш} C}{r_{ш} + r_p} \frac{du_{\Phi}}{dt} \Big|_{t < t_{\Phi}} \left( 1 - e^{-t/T_3} \right), \quad (11)$$

тобто практично  $i_p(t) \sim \frac{du_{\Phi}}{dt} \Big|_{t < t_{\Phi}}$ .

Розглянемо схему, в якій джерелом сигналу, для розглянутого захисту, є спеціальний трансформатор струму з повітряним проміжком (рис. 7) [1, 2, 4].

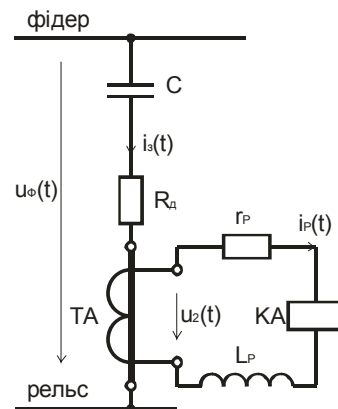


Рис. 7

В режимі короткого замикання і тим самим при зміні фідерної напруги  $u_{\Phi}(t)$  у «вітці захи-

сту» з'являється змінний струм  $i_3(t)$ . В результаті, внаслідок явища взаємоіндукції, на вторинній обмотці трансформатора струму ТА індукується ЕРС взаємоіндукції, яка створює на затискачах вторинної обмотки напругу від взаємоіндукції:

$$u_2(t) = M \frac{di_3}{dt}, \quad (12)$$

де  $M$  – коефіцієнт взаємоіндукції між обмотками трансформатора струму.

З іншої сторони, для контура з реле струму за 2-им законом Кірхгофа:

$$u_2(t) = r_p i_p(t) + L_p \frac{di_p}{dt}. \quad (13)$$

Прирівняємо (12) до (13) і підставимо замість  $i_3(t)$  вираз (6), тоді отримаємо:

$$MC \frac{d}{dt} \left[ \frac{du_\Phi}{dt} \left( 1 - e^{-t/T_3} \right) \right] = r_p i_p(t) + L_p \frac{di_p}{dt}. \quad (14)$$

Оскільки функція  $u_\Phi$  на початковій стадії короткого замикання є лінійною, то крутизна її фронту, тобто  $\frac{du_\Phi}{dt}$ , є величиною сталою і тоді після диференціювання лівої частини рівності (14) прийме вигляд:

$$\frac{M}{R_d} \frac{du_\Phi}{dt} e^{-t/T_3} = r_p i_p(t) + L_p \frac{di_p}{dt}. \quad (15)$$

Розділивши обидві частини рівності (15) на  $r_p$  та прийнявши, що стала часу  $T_p$  маленького значення, що другою складовою правої частини виразу (15) можна знехтувати, кінцево отримаємо:

$$i_p(t) = \frac{M}{R_d r_p} \frac{du_\Phi}{dt} \Big|_{t < T_3} e^{-t/T_3}. \quad (16)$$

Таким чином, струм реле струму (тобто його реакція) прямо пропорційна крутизні фронту імпульсу спадання фідерної напруги.

Розглянемо роботу захисту по схемі моста [1], в діагональ якого ввімкнено реле (рис. 8). Завдяки рівним активним опорам  $R$  пліч моста він при нормальних режимах роботи (навіть якщо  $U_\Phi$  буде ідеально згладженим чи буде коливатися) буде знаходитися в рівновазі, тоді  $u_{24}(t) = 0$  і струм реле  $i_p(t)$  також дорівнюватиме 0 ( $i_p(t) = 0$ ).

При різкій зміні  $u_\Phi$  струм  $i_3(t) \neq 0$ . І якщо стала часу моста  $T_M$  буде дуже маленького значення у порівнянні із сталою часу «вітки

захисту»  $T_3$ , то при малому струму через реле  $i_p(t)$  струм через плече моста буде рівним [1]:

$$i_R = i_L = \frac{r_{ш}}{2R} i_{ш}. \quad (17)$$

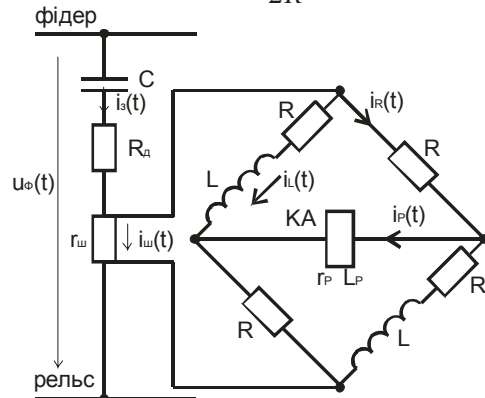


Рис. 8

Для контуру 1-2-4-1 рис. 8 маємо:

$$\begin{aligned} -R i_L(t) - L \frac{di_L}{dt} + r_p i_p(t) + \\ + L_p \frac{di_p}{dt} + R i_R(t) = 0, \end{aligned} \quad (18)$$

чи з врахуванням рівності  $i_R = i_L$ :

$$L \frac{di_L}{dt} = r_p i_p(t) + L_p \frac{di_p}{dt}. \quad (19)$$

Для вузла з шунтом рис. 8:

$$i_3(t) = i_M(t) + i_{ш}(t).$$

Відповідно для вузла 1:

$$i_M(t) = i_R(t) + i_L(t) = 2i_L(t).$$

Тоді  $i_3(t) = i_{ш}(t) + 2i_L(t)$ , звідки

$$i_{ш}(t) = i_3(t) - 2i_L(t). \quad (20)$$

Підставимо в (20) вираз (6) для  $i_3(t)$  і струм  $i_{ш}(t)$  з виразу (17), отримаємо:

$$\frac{2R}{r_{ш}} i_L = C \frac{du_\Phi}{dt} \left( 1 - e^{-t/T_3} \right) - 2i_L. \quad (21)$$

З цього виразу струм  $i_L$  дорівнює:

$$i_L = \frac{Cr_{ш}}{2(R+r_{ш})} \frac{du_\Phi}{dt} \left( 1 - e^{-t/T_3} \right). \quad (22)$$

Підставимо (22) в (19) і, продиференціювавши, отримаємо:

$$\frac{Lr_{ш}}{2(R+r_{ш})R_d} \frac{du_\Phi}{dt} e^{-t/T_3} = r_p i_p(t) + L_p \frac{di_p}{dt}. \quad (23)$$

Поділивши обидві частини рівності (23) на  $r_p$  та враховуючи, що стала часу  $T_p$  настільки маленька, що можна знехтувати складовою  $L_p \frac{di_p}{dt}$ , кінцево отримаємо:

$$i_p(t) = \frac{L r_{ш}}{2(R + r_{ш}) R_d r_p} \frac{du_{\Phi}}{dt} \Big|_{t < t_{\Phi}} e^{-t/T_3}, \quad (24)$$

тобто реакція реле часу пропорційна швидкості зменшення фідерної напруги.

Слід зазначити, що формули (11), (16) і (24) для струму реле справедливі за умови, що стала часу  $T_p$  дуже маленька, чого легко досягти, застосовуючи електронні реле (але дуже важко – у електромагнітних).

Як було зазначено вище, всі види релейного захисту основані на порівнянні значень певних ознак і при нормальних та аварійних режимах роботи системи. В запропонованому виді захисту такими ознаками є  $\frac{du_{\Phi}}{dt}$ , значення якого в режимі короткого замикання наведені в табл. 1 для однієї з ділянок тягового електропостачання Придніпровської залізниці.

Таблиця 1

Тип ШВ	Значення $\frac{du_{\Phi}}{dt}$ , кВ/с		
	Близьке КЗ	Середнє КЗ	Дальнє КЗ
2×ВАБ-43	3214,0	1254,4	586,4
2×ВАБ-49	2722,5	712,5	476,5

При відключенні ШВ під час струмового перенавантаження  $\frac{du_{\Phi}}{dt} = 330$  кВ/с. Під час пуску ЕРС фідерна напруга не змінюється.

Для визначення  $\frac{du_{\Phi}}{dt}$  в нормальному режимі роботи звернемося до такого показника якості електроенергії для електричних мереж постійного струму (згідно ГОСТ 13109-97) як коливання напруги, під яким розуміють швидку зміну, що відбувається зі швидкістю 1...2 % за секунду. Тут 1...2 % – відносне відхилення (амплітуда) коливання напруги  $\delta U_t$ , яке визначають відносною різницею між слідуючими один за одним екстремумами напруги

$$\delta U_t = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100 \%.$$

Звідси випливає, максимальна зміна фідерної напруги (згідно цього виразу) складася:

$0,02 \cdot 3,3 = 0,066$  кВ за 1 секунду, що значно нижче  $\frac{du_{\Phi}}{dt}$ , наведених у табл. 1.

Тепер розглянемо екстремальне значення зміни фідерної напруги згідно правил технічної експлуатації. Як відомо, згідно ПТЕ  $U_{\max} = 4$  кВ,  $U_{\min} = 2,7$  кВ. Тоді найбільш несприятливе відхилення напруги буде:  $4 - 2,7 = 1,3$  кВ/с, що значно нижче табличних значень.

З цього короткого аналізу виходить, що захист на запропонованому принципі:

- 1) «відрізняє» нормальні та аварійні режими;
- 2) «відрізняє» вид короткого замикання («близьке», «середнє», «дальнє»).

Для цього необхідно на тяговій підстанції встановити три комплекти захисту, в кожен з яких реле струму налаштувати на відповідне значення  $\frac{du_{\Phi}}{dt}$ . В цьому випадку відповідне

реле буде спрацьовувати при відповідному КЗ. Або застосовувати цей принцип в багатопараметричних системах захисту, побудованих на мікропроцесорній елементній базі.

#### БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Кучма, К. Г. Защита от токов короткого замыкания в контактной сети [Текст] / К. Г. Кучма, Г. Г. Марквардт, В. Н. Пупынин. – М.: Трансжелдориздат, 1960. – 303 с.
2. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог [Текст] / К. Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
3. Сердинов, С. М. Повышение надежности устройств электроснабжения электрифицированных железных дорог [Текст] / С. М. Сердинов. – М.: Транспорт, 1985. – 301 с.
4. Фигурнов, Е. П. Релейная защита [Текст] / Е. П. Фигурнов. – К.: Транспорт України, 2004. – 565 с.
5. Пупынин, В. Н. Сравнение фидерных выключателей постоянного тока 2×ВАБ-49-3200/3-Л и GERapid 4207 2×4 [Текст] / В. Н. Пупынин, С. Х. Дарчиев // Железные дороги мира. – 2006. – № 5. – С. 64-71.
6. Анисов, А. Н. Повышение эффективности работы защиты фидеров контактной сети на основе исследования переходных процессов токов короткого замыкания в тяговой сети и на подвижном составе [Текст] : дис. ... канд. техн. наук / А. Н. Анисов. – М., 2000. – 138 с.
7. Костін, М. О. Теоретичні основи електротехніки [Текст] / М. О. Костін, О. Г. Шейкіна. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2007. – Т. 2. – 368 с.

Надійшла до редколегії 17.01.2011.

Прийнята до друку 21.01.2011.