

УДК 621.314.213.08

П. Євтух, докт. техн. наук; С. Бабюк

Тернопільський національний технічний університет
імені Івана Пулюя

ОЦІНКИ ПОХИБОК ДЖЕРЕЛ СИГНАЛІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ ЗА НАВАНТАЖЕННЯМ

Резюме. Подано матеріал, який доводить, що величина остаточної похибки високовольтного вимірювального трансформатора напруги, що скоректована за паспортними даними, не перевищує 0,05%, а також матеріал, який доводить існування методу визначення характеристик сигналів високовольтних вимірювальних трансформаторів струму з низьковольтного боку, які можуть бути застосовані у виробничих умовах для визначення похибки, близької до фактичної, при реальному навантаженні.

Ключові слова: сигнал, високовольтний вимірювальний перетворювач, трансформатор струму, трансформатор напруги, похибка, модель.

P. Yevtukh, S. Babyuk

ERROR ESTIMATE SIGNAL SOURCES OF ELECTRICAL POWER SYSTEMS FOR LOADING

The summary. The paper submitted material proves that the value of the final error of measuring the high-voltage transformer, which adjusted for the passport data does not exceed 0.05%. Also submitted material that proves the existence of a method for characterization of high-signal measuring current transformers with low voltage side, which can be applied in a production environment to determine the error, close to the actual, with real load.

Key words: signal voltage instrument transformer, current transformer, the transformer voltage error model.

Постановка проблеми. Похибки джерел сигналів визначають точність функціонування систем вимірювання потужності та обліку електроенергії у високовольтних колах, систем релейного захисту в електромережах, схем управління високовольтним електроприводом і т.д. Тому завдання зниження цих похибок є актуальною в електроенергетиці.

Відомо, що більш як 15% генерованої електростанціями України електроенергії завдяки прихованому відбору не обліковується, не оплачується, і фактично витрачається [1]. Пошуковими дослідженням встановлено, що у високовольтних мережах за допомогою спеціальної комп'ютерної технології, побудованих на базі нових розроблених моделей, є можливим скоректувати моделі похибок відповідних вимірювальних засобів вимірювання й обліку електроенергії, підвищити точність обліку і підняти її до рівня, необхідного для виявлення й обліку прихованих витрат електроенергії. Корекцію точності засобів обліку електроенергії можна здійснювати автоматично, в реальному часі, за допомогою обчислювальної техніки, якщо знати моделі похибок вимірювальних перетворювачів. Завдання ускладнюється тим, що для його вирішення заміна існуючих в експлуатації високовольтних вимірювальних перетворювачах та засобах обліку не є необхідною, що здешевлює й суттєво спрощує практичну реалізацію поставленого завдання. Позитивні результати пошукових досліджень у напрямку виявлення та обліку прихованих витрат електроенергії у високовольтних мережах підтверджено експериментально [2].

Дана стаття присвячена оцінюванню величини остаточної похибки високовольтного вимірювального трансформатора напруги, що скоректована за паспортними даними, а також доводить існування методу визначення характеристик сигналів високовольтних вимірювальних трансформаторів струму з низьковольтного боку в умовах експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В роботі [2] представлено матеріал для визначення характеристик сигналів високовольтних вимірювальних трансформаторів напруги експериментальним шляхом. Відповідно до цього з'явилася можливість скомпенсувати похибки сигналів цих пристроїв. Але раніше не було проведено оцінювання величини залишкової похибки по напрузі вимірювального трансформатора напруги, скоректованої за паспортними значеннями.

До цього часу для того, щоб визначити характеристики сигналів високовольтних вимірювальних трансформаторів струму, необхідно від'єднати їх від високовольтної мережі [3–6]. Проте процедура від'єднання вимірювального трансформатора струму в умовах експлуатації під навантаженням пов'язана зі значними організаційними труднощами, оскільки трансформатор струму обслуговує окрім пристроїв вимірювання споживаної потужності і обліку електроенергії, ще й кола захисту.

Мета роботи. Довести, що величина остаточної похибки високовольтного вимірювального трансформатора напруги, що скоректована за паспортними даними, не перевищує 0,05%. Розглянути спосіб вимірювання характеристик сигналів трансформаторів струму з низьковольтного боку, які можуть бути застосовані у виробничих умовах для визначення похибки, близької до фактичної, при реальному навантаженні.

Постановка задачі. Покажемо, що величина остаточної похибки вимірювального ТН не перевищує 0,05%.

Із виразу

$$\delta\hat{U} = aS_2 + c\hat{U}_1 + g,$$

який є моделлю похибки високовольтного вимірювального трансформатора напруги [2], коефіцієнти якого визначаються співвідношеннями [2]

$$a = \frac{4}{3S_{2i}} (\delta\hat{U}_2 - \delta\hat{U}_1); c = \frac{2,5}{U_{ii}} (\delta\hat{U}_3 - \delta\hat{U}_1); g = 3,33\hat{U}_1 - 0,33\delta\hat{U}_2 - 2\delta\hat{U}_3$$

бачимо, що похибка $\delta\hat{U}$ є результатом непрямого вимірювання, так як для її обчислення використовуються паспортні дані $\delta\hat{U}_1, \delta\hat{U}_2, \delta\hat{U}_3$. Вимірювання цих похибок виконується на повірочній вимірювальній установці заводу виробника по диференціально-нульовому методу визначення похибок.

Похибка диференціально-нульового методу визначається як похибкою використовуваної міри – зразкового вимірювального трансформатора, так і похибкою приладу порівняння, що вимірює різницю напруг. При цьому остання складова похибки за інших рівних умов буде тим менша, чим менша різниця вимірюваної величини, створеної зразковим трансформатором напруги. Результуючий ефект дії порівнюваних величин через прилад порівняння доводять до нуля, то при цьому максимально усувається складова похибки, зумовлена власною похибкою приладу порівняння.

В таблиці 1 [7] наведені дані границі остаточних допустимих основних похибок напруги приладу порівняння типу К-507, а границі допустимих похибок зразкового вимірювального трансформатора наведено в таблиці 2 [7].

У повірочній метрологічній установці заводу виробника використовується зразковий вимірювальний трансформатор напруги класу точності 0,05, і прилад порівняння К-507. У цьому випадку з таблиці 2 [7] бачимо, що коли перевірка

виконується без урахування похибок зразкового ТН з класом точності 0,5, то завод-виробник з допомогою зразкового ТН з класом точності 0,05 може повірять ТН з класом точності 0,2 і нижче (0,5; 1,0; 5,0; 2,0; 10). З таблиці 1 [7] бачимо, що застосування в повірочній метрологічній установці приладу порівняння К-507 також дозволяє заводу-виробнику повірять ТН з класом точності 0,2 і нижче. За своєю природою похибка приладу порівняння К-507 є випадковою, а похибка зразкового ТН – систематичною. Відомо, що випадкову складову похибки вимірювання виключити із результатів цього однократного вимірювання неможливо. Величина цієї випадкової складової є тією теоретичною межею, до якої можна підвищувати точність вимірювань. Оскільки здійснюється компенсація систематичної складової похибки ТН, то доцільно знати, до якої границі точності можна здійснювати компенсацію систематичної похибки цього ТН. Така можливість є, якщо проаналізувати таблицю 1 [7]. При повірці ТН класом точності 0,2 і 0,5 границею точності, до якої можна здійснювати компенсацію систематичної похибки вимірювання, є границі $\pm 0,003\%$. При повірці ТН з класом точності 1 або 3 границею точності, до якої можна здійснювати компенсацію, є межі $\pm 0,01\%$ або $\pm 0,03\%$. При сумісному аналізі таблиці 1 [7] і границь похибок напруги зразкового ТН можна визначити, що при повірці ТН з класом точності 0,2 і 0,5 похибка приладу порівняння у 17 разів менша, ніж похибка зразкового трансформатора і тому нею можна знехтувати. Також при повірці ТН з класом точності 1,0 похибка приладу порівняння у 5 разів менша, ніж похибка зразкового ТН й тому нею можна знехтувати. При повірці ТН з класом точності 2,0 похибка приладу порівняння обмежена границями $\pm 0,03\%$ і стає співрозмірною із похибкою зразкового ТН, обмеженої межами $\pm 0,05\%$. В останньому випадку похибку приладу порівняння К-507 необхідно враховувати при здійсненні компенсації систематичної складової похибки ТН.

Таким чином при вимірюванні похибки напруги ТН $\delta \hat{U}_i$, $i=1,2,3,4$, диференціально-нульовим методом в результат вимірювання вноситься додаткова похибка δU_{0i} , величина якої залежить від систематичної складової похибки (похибка напруги зразкового ТН) і випадкової складової похибки (похибка напруги приладу порівняння К-507), причому при повірці ТН класом точності 0,2; 0,5; 1,0 на заводі-виробнику впливом метрологічних властивостей приладу порівняння К-507 можна знехтувати.

В останньому випадку похибка δU_{0i} є систематичною, тому її можна алгебраїчно додавати, що рекомендується робити в документах при визначенні похибки напруги ТН, що повіряється. Дійсні значення похибок можна подати у вигляді

$$\delta U_i = \delta \hat{U}_i + \delta U_{0i} \quad i=1,2,3, \quad (1)$$

де $\delta \hat{U}_i$ – середнє арифметичне значення відліків за шкалою приладу К-507, отриманих при збільшенні й зменшенні вимірювальної напруги і подане у паспорті ТН;
 δU_{0i} – похибка зразкового ТН.

На заводі-виробнику клас точності ТН, що повіряється, визначають без урахування похибок зразкового ТН. У цьому випадку з таблиці 1 [7] бачимо, що паспортні значення похибки напруги

$$\delta \hat{U}_i = \delta U_i - \delta U_{0i} \quad (2)$$

відрізняється від своїх дійсних значень δU_i на величину систематичної похибки зразкового ТН.

Оскільки коефіцієнти a , c , g формуються значеннями похибок $\delta\hat{U}_i$, а ці паспортні дані виміряні з похибками δU_{0i} , то необхідно вяснити, з якою похибкою визначиться вся $\delta\hat{U}$. Для того, щоб розв'язати цю задачу, перетворимо $\delta\hat{U}$ у форму

$$\delta\hat{U} = \sum_{i=1}^3 a_i \delta\hat{U}_i, \quad i=1,2,3 \quad (3)$$

$$a_1 = 3,333 + 2,5 \frac{U_1}{U_{1i}} - 1,333 \frac{S_2}{S_{2i}}, \quad (4)$$

$$a_2 = 1,333 \frac{S_2}{S_{2i}} - 0,333, \quad (5)$$

$$a_3 = 2,5 \frac{U_1}{U_{1i}} - 2. \quad (6)$$

З урахуванням (2) рівняння (3) набуде вигляду

$$\delta\hat{U} = \sum_{i=1}^3 a_i (\delta U_i - \delta U_{0i}) \quad (7)$$

$$\delta\hat{U} = \sum_{i=1}^3 a_i \delta U_i - \sum_{i=1}^3 a_i \delta U_{0i}, \quad i = 1,2,3$$

Тут перша складова

$$\delta U = \sum_{i=1}^3 a_i \delta U_i \quad (8)$$

шукана похибка, а друга складова

$$\delta U_0 = \sum_{i=1}^3 a_i \delta U_{0i}, \quad (9)$$

похибка, котра формується похибками напруги зразкового ТН δU_{0i} , причому із таблиці 2 [7] відомо, що

$$-\delta_0 \leq \delta U_{0i} \leq \delta_0, \quad (10)$$

де δ_0 – визначається класом точності ТН, що повіряється (для класу точності 0,2 $\delta_0=0,05$). Так як навантаження зразкового ТН при вимірюваннях постійне, то

$$\delta U_{01} = \delta U_{02}, \quad (11)$$

і тому (9) набуде такого вигляду

$$\delta U_0 = (a_1 + a_2) \delta U_{01} + a_3 \delta U_{03} \quad (12)$$

Розглянемо в (12) коефіцієнти $A = a_1 + a_2$ і a_3 . З допомогою (4) і (5) це можна представити як

$$A = 3 - 2,5 \frac{U_1}{U_{1i}} \quad (13)$$

Звідси випливає, що при $U_1 = 0,8 U_{1н}$ $A = 1$, а при $U_1 = 1,2 U_{1н}$ $A = 0$. Коли U_1 збільшується від $0,8 U_{1н}$ до $1,2 U_{1н}$, коефіцієнт A зменшується від 1 до 0, залишаючись при цьому додатним. Враховуючи вираз 6 для коефіцієнта a_3 , можна зробити висновок, що при $U_1 = 0,8 U_{1н}$ $a_3 = 0$, а при $U_1 = 1,2 U_{1н}$ $a_3 = 1$. При збільшенні U_1 від $0,8 U_{1н}$ до $1,2 U_{1н}$ коефіцієнт a_3 збільшується від 0 до 1. Таким чином, коефіцієнти A , a_3 будуть додатними і, враховуючи нерівність (4.10), можна записати

$$-A\delta_0 - a_3\delta_0 \leq (A\delta U_{01} + a_3\delta U_{03}) \leq A\delta_0 + a_3\delta_0 \quad (14)$$

Так як із (13) і (6) випливає, що $A + a_3 = 1$, то (14) набуде вигляду

$$-\delta_0 \leq \delta U_0 \leq \delta_0 \quad (15)$$

Для зразкового ТН класу точності 0,05 повірочної установки матимемо
 $-0,05 \leq \delta U_0 \leq 0,05$.

Оскільки

$$\delta \hat{U} = \delta U - \delta U_0, \quad (16)$$

то введення поправки $\delta \hat{U}$ у результат повірки, отриманий зі співвідношення (2) [2], дає вираз

$$\delta \check{U} = \frac{\hat{U}_1}{1 + 0,01 \cdot \delta U}, \quad (17)$$

де \check{U}_1 – скоректоване значення напруги U_1 , яке є точнішим, проте відрізняється від дійсного значення цієї напруги.

Для того, щоб визначити залишкову похибку вимірювання первинної напруги, представимо (2) [2] у вигляді

$$U = \frac{\hat{U}_1}{1 + 0,01 \cdot \delta U} = \frac{\hat{U}_1}{1 + 0,01 \cdot \delta U} \cdot \frac{1 + 0,01 \cdot \delta \hat{U}}{1 + 0,01 \cdot \delta U}$$

або

$$U_1 = \check{U}_1 \cdot \frac{1 + 0,01 \cdot \delta \hat{U}}{1 + 0,01 \cdot \delta U} \quad (18)$$

Другий співмножник в (18) дорівнює

$$k = \frac{1 + 0,01 \cdot \delta \hat{U}}{1 + 0,01 \cdot (\delta \hat{U} + \delta U_0)} = \left(1 + \frac{0,01 \cdot \delta U_0}{1 + 0,01 \cdot \delta \hat{U}} \right)^{-1}, \quad (19)$$

оскільки $0,01 \delta \hat{U} \ll 1$, то

$$k = \frac{1}{1 + 0,01 \cdot \delta U_0} \quad (20)$$

Коефіцієнт k є мірою співпадіння скоректованого значення \check{U}_1 з дійсним значенням U_1 .

Тоді (18) має вигляд

$$U_1 = \frac{\check{U}_1}{1 + 0,01 \cdot \delta U_0} \quad (21)$$

Звідси випливає, що залишкова похибка вимірювання дорівнює

$$\delta U_0 = \frac{\check{U}_1 - U_1}{U_1} \cdot 100\% \quad (22)$$

і для зразкового ТН заводу-виробника $-0,05 \leq \delta U_0 \leq 0,05$.

Таким чином, наведений матеріал підтверджує, що залишкова похибка ТН не перевищує величини $\pm 0,05\%$.

Враховуючи, що $-0,05 \leq \delta_0 \leq 0,05$, коефіцієнт $k = 0,9995$. Це свідчить про те, що залишкове значення похибок ТН, скоректованих за паспортними даними, не перевищує $0,05\%$.

Характеристики сигналів трансформаторів струму в умовах експлуатації.

Йде справа з розв'язанням задачі – визначенням величини відносної струмової і кутової похибок, які залежать від властивостей сталі трансформатора, особливостей навантаження в низьковольтній обвитці й так далі, які змінюються в процесі експлуатації. Ці параметри необхідно визначати періодично (відповідно до ГОСТу не

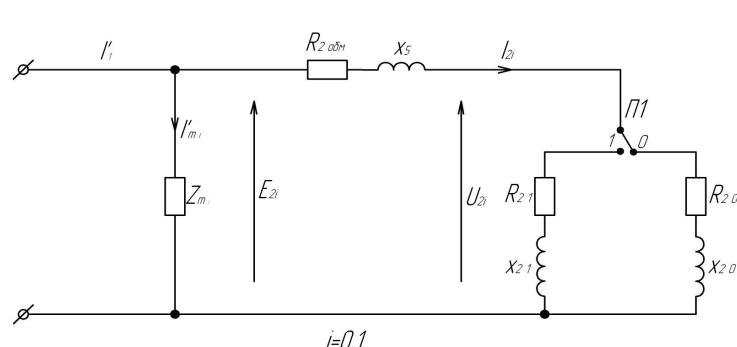
рідше, ніж раз на 5 років). Для її розв'язання будемо використовувати спеціально розроблений для цієї мети варіант диференціального-нульового методу. Суть його розкривається детально в подальшому матеріалі, а в даному випадку необхідно лише відзначити, що для задоволення вимог метрології, для вимірювання досить складної схеми з використанням апарату К507, який випускається серійно. Відліки, узяті по вимірювальних шкалах цього приладу, в розробленій схемі повністю дозволяють вирішити друге завдання. Відповідна схема представлена на рисунку 1.

Нехай до вторинної обвитки вимірювального ТС під'єднане навантаження

$$Z_{zi} = R_{zi} + jx_{zi}, \quad i = 0, 1 \quad (23)$$

де R, x – відповідно активна й реактивна складові цього навантаження.

Через первинну обвитку вимірювального ТС протікає первинний струм I_1 (на еквівалентній схемі розглядається приведений первинний струм)



$$I_1^i = \frac{I_1}{k}, \quad (24)$$

де k – коефіцієнт трансформації ТС.

Нехай за допомогою перемикача П1 є можливість перемикати навантаження у вторинній обвитці (розуміється, не розриваючи при цьому коло навантаження) і передбачити, що

Рисунок 1. Еквівалентна електрична схема вимірювального ТС

в даному випадку під'єднано навантаження

$$\dot{Z}_{20} = R_{20} + jx_{20}.$$

У цьому випадку в усіх індексах позначень рис.1, куди входить $i, i = 0$.

З рис.1 бачимо, що, якби було відсутнє коло намагнічення з опором Z_{20} , то комплекс вторинного струму I_{20} збігався б за величиною з приведеним первинним струмом I_1^i . Через коло намагнічення протікає комплексний струм

$$I_{m0}' = \frac{I_{m0}}{k}. \quad (25)$$

(Комплексний струм у колі намагнічення приведений до вторинної обвитки). З рис. 1 також бачимо, що коло вторинної обвитки окрім вторинного навантаження Z_{20} містить активний опір вторинної обвитки $R_{2_обв}$ і опір розсіювання магнітного потоку X_5 (для ТС, що виготовляються ЗВА), приймаємо, що $X_5=0$.

Відповідна еквівалентній електричній схемі ТС, що представлена на рис.1, векторна діаграма для випадку, коли відношення кількості витків вторинної і первинної обмоток дорівнює коефіцієнту трансформації k , наведена на рис. 2, де введені такі позначення:

Φ_{m0} – лінія вектора максимального магнітного потоку в магнітопроводі при робочому режимі ТС з під'єднаним навантаженням Z_{20} (тут і далі при описуванні рис. 2 $i = 0$);

$B_{max i}$ – лінія вектора максимальної індукції в магнітопроводі, яка співпадає з напрямом вектора Φ_{mi} ;

E_{2i} – вектор е.р.с., що наводиться магнітним потоком сердечника Φ_{mi} ;

α_i – кут зсуву фаз між векторами E_{2i} і I_{2i} ;
 ψ_i – кут втрат.

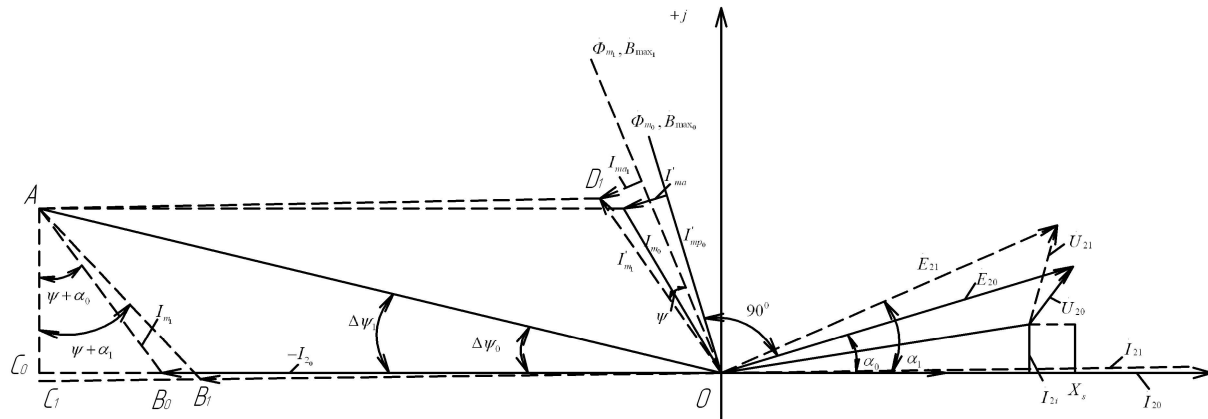


Рисунок 2. Векторна діаграма вимірювального ТС

З векторної діаграми бачимо, що наявність приведенного намагнічуючого струму I_{mi} порушує наявну в ідеальному випадку рівність вторинного струму I_{2i} і приведеного первинного струму I_1' за амплітудою і за напрямком. У першому випадку виявляється вплив відносної струмової похибки ТС без виткової поправки δ_{li}'' , у другому – вплив кутової похибки ТС $\Delta\psi_i$. З рис. 2 визначаються дві похибки: відносна струмова похибка ТС без виткової поправки

$$\delta I_{ni} = -\xi \sin(\psi + \alpha_0) \quad (26)$$

де $\xi = \frac{I_{m0}'}{I_1'}$,

і кутова похибка

$$\Delta\psi = \xi \cos(\psi + \alpha_0) \quad (27)$$

(у позначеннях $\delta I''$ і $\Delta\psi$ параметр i відкинутий). Ці похибки формуються відповідно величиною сили струму намагнічення I_{mi}' і сумарним кутом $\psi + \alpha_i$. Очевидно, що й відносна струмова похибка ТС без виткової поправки $\delta I''$ і його кутова похибка $\Delta\psi$ є функціями від величини кута зсуву фаз між векторами E_{20} і I_{20} (α_0).

Повністю модель визначення кутової та струмової похибок високовольтних вимірювальних трансформаторів струму буде подано в наступних публікаціях, бо даний матеріал проходить етап отримання патенту на корисну модель.

Висновки. Доведено, що величина остаточної похибки високовольтного вимірювального трансформатора напруги, що скоректована за паспортними даними, не перевищує 0,05%. Подано матеріал, який доводить існування методу визначення характеристик сигналів високовольтних вимірювальних трансформаторів струму з низьковольтного боку, які можуть бути застосовані у виробничих умовах для визначення похибки, близької до фактичної, при реальному навантаженні.

Література

1. Энергетическая политика Украины [Текст]. – 2005. – №12(64). – С. 17–18.
2. Євнух, П. Моделі похибок високовольтних вимірювальних трансформаторів напруги [Текст] / П. Євнух, Н. Куземко, С Бабюк. – Тернопіль: Вісник ТДТУ. – 2009. – Том 14. – № 2. – С.85–93.
3. Быков, М.А. Курс электрических измерений, часть I [Текст] / М.А. Быков, В.Т. Прытков, А.В. Галицкий. – М.: Госэнергоиздат, 1960 – 480с.
4. Любимов, Л.И. Проверка средств электрических измерений. Справочная книга [Текст] / Л.И. Любимов, И.Д. Форсилова, Е.З. Шапиро. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 296 с.
5. Методические указания по косвенному определению погрешностей измерительных трансформаторов тока в рабочих условиях применения. Минэнерго СССР, главное НТУ энергетики и электрификации, произв-е объединение по наладке, совершенствованию и эксплуатации электростанций и сетей "Союзтехэнерго", СПО Союзтехэнерго [Текст]. – М., 1990.
6. Кизилев, В.У. Проектування вимірювальних трансформаторів струму та напруг, трансреакторів та дроселів змінного струму пристроїв автоматики енергосистем: навч.-метод. посібник [Текст] / В.У. Кизилев. – Х.: ХДПУ, 2000. – 73 с.
7. К-507. Устройство для поверки измерительных трансформаторов кл.т 0,05 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://zapadpribor.com/index.php?page=product&id=63&l=ua>.
- 8.

Отримано 02.11.2011