

## ПІДВИЩЕННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ТРАНСФОРМАТОРІВ ЗНИЖУВАЛЬНИХ ПІДСТАНЦІЙ ПІДПРИЄМСТВ НАФТОГАЗОВОЇ ГАЛУЗІ

Ю.Ф. Романюк, К.В. Коломойцев

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 48003,  
e-mail: feivt@nug.edu.ua

*Розглядаються питання підвищення коефіцієнта корисної дії (ККД) трансформаторів знижувальних підстанцій нафтогазопромислових підприємств. Показано, що ККД трансформатора в усіх випадках збільшується з підвищенням коефіцієнта потужності навантаження незалежно від зміни його характеру та величини. Оптимальний коефіцієнт завантаження трансформатора, який відповідає максимальному ККД, залежить не тільки від номінальних параметрів трансформатора, але й значною мірою від його вхідної напруги. Максимальні значення ККД сучасних трансформаторів відповідають низьким коефіцієнтам їх завантаження. З метою зменшення втрат потужності в трансформаторах при заданому навантаженні вхідну напругу потрібно регулювати так, щоб забезпечити їх роботу з найвищим ККД. Визначено економічну ефективність регулювання рівня вхідної напруги трансформаторів.*

Ключові слова: знижувальна підстанція, силовий трансформатор, коефіцієнт завантаження, втрати потужності, коефіцієнт корисної дії, регулювання напруги, економічна ефективність.

*Рассматриваются вопросы повышения коэффициента полезного действия (КПД) трансформаторов понижающих подстанций нефтегазопромисловых предприятий. Показано, что КПД трансформатора во всех случаях увеличивается с повышением коэффициента мощности нагрузки независимо от изменения ее характера и величины. Оптимальный коэффициент загрузки трансформатора, соответствующий максимальному КПД, зависит не только от номинальных параметров трансформатора, но и в значительной степени от его входного напряжения. Максимальные значения КПД современных трансформаторов соответствуют низким коэффициентам их загрузки. С целью уменьшения потерь мощности в трансформаторах при заданной нагрузке входное напряжение нужно регулировать так, чтобы обеспечить их работу с наивысшим КПД. Определена экономическая эффективность регулирования уровня входного напряжения трансформаторов.*

Ключевые слова: понижающая подстанция, силовой трансформатор, коэффициент загрузки, потери мощности, коэффициент полезного действия, регулирование напряжения, экономическая эффективность.

*The article deals with the problems of efficiency factor enhancement of step-down substation transformer at oil and gas industry enterprises. It is shown that a transformer efficiency factor grows when the load power factor increases regardless its nature and value. Optimal load factor of the transformer that has maximum efficiency factor depends not only on the transformer nominal parameters, but also on the input voltage. Maximum efficiency factor values of modern transformers correspond to low factors of their loading. To reduce transformer power losses at the specified load the input voltage should be adjusted in order to provide their operation with the highest efficiency factor. Economic efficiency of the transformer input voltage adjustment was determined.*

Key words: step-down substation, transformer, efficiency factor, load factor, power loss, voltage adjustment, economic efficiency.

### Постановка проблеми

Проблема зниження втрат електроенергії в електричних мережах промислових підприємств, у тому числі підприємств нафтової та газової промисловості, останнім часом набула особливої актуальності у зв'язку з суттєвим здорожчанням електроенергії та дефіцитом палива на електростанціях. Тому під час експлуатації цих мереж доцільно впроваджувати заходи щодо підвищення економічної ефективності роботи основних елементів електропостачальних систем – ліній і трансформаторів. Одним з важливих напрямків енергозаощадження є забезпечення економічних режимів роботи трансформаторів знижувальних підстанцій. Важливим в даний час є розроблення додаткових заходів щодо зниження втрат потужності в трансформаторах та підвищення їх ККД.

### Аналіз публікацій

Для підвищення економічності роботи трансформаторів знижувальних підстанцій розроблена та впроваджується низка ефективних заходів з метою зниження втрат потужності й енергії в трансформаторах, зокрема, вимкнення частини трансформаторів на двотрансформаторних підстанціях у разі зменшення їх навантаження, оптимальний розподіл навантаження між трансформаторами, заміна недовантажених трансформаторів на трансформатори меншої потужності, вирівнювання графіків електричних навантажень, підвищення коефіцієнта потужності навантаження, симетрування режимів, регулювання напруги з метою зменшення електроспоживання та інші [1-6].

Як відомо, коефіцієнт корисної дії трансформатора (ККД) залежить від величини втрат потужності в ньому, які складаються з втрат неробочого ходу та навантажувальних втрат.

Втрати неробочого ходу зумовлені втратами в сталі від вихрових струмів і втратами на гістерезис. Основними конструктивними шляхами зниження цих втрат і підвищення ККД трансформаторів є використання високоякісних марок сталі для виготовлення магнітних осердь трансформаторів (зокрема, аморфної сталі), застосування новітніх технологій виготовлення магнітної системи, особливо технології різання сталі, зменшення товщини її листів, вдосконалення конструкції осердя і стиків листів сталі, зменшення додаткових втрат у зовнішніх по відношенню до обмоток металевих частинах бака шляхом їх екранування тощо [1]. Потрібно зауважити, що трансформатори, осердя яких виготовлені з аморфної сталі, за своєю конструкцією набагато важчі й більші за розміром, ніж традиційні трансформатори.

Навантажувальні втрати (втрати в міді) визначають через втрати короткого замикання, які складаються з втрат на нагрівання обмоток, а також додаткових втрат у стінках бака та інших металевих частинах, викликаних потоком розсіювання. Ці втрати залежать квадратично від потужності навантаження й обернено пропорційні квадрату вхідної напруги. Зменшити їх можна, підвищивши напругу на вході трансформатора. Але при цьому одночасно збільшуються втрати в сталі.

У роботі [7] досліджено вплив вхідної напруги на виводах обмотки ВН силових трансформаторів районної мережі напругою 110 кВ на зміну втрат потужності та енергії в трансформаторах. Показано, що при навантаженнях трансформаторів менше 50% від їх номінальної потужності втрати потужності в них збільшуються з ростом вхідної напруги, а при навантаженнях більше 55% втрати потужності, навпаки, зменшуються зі збільшенням вхідної напруги. При навантаженні трансформаторів в межах (50...55)% зміна вхідної напруги практично не впливає на величину втрат потужності. Також у [7] показано, що заміна недовантажених трансформаторів на трансформатори меншої потужності, з огляду на зниження втрат активної енергії, не завжди доцільна.

Авторами [8] розроблено програму і проаналізовано структуру втрат потужності в розподільчій електричній мережі напругою 10 кВ. Показано, що сумарні річні втрати електроенергії становлять 6,5% від відпуску електричної енергії в мережу, причому близько 70% від сумарних втрат становлять втрати неробочого ходу в розподільчих трансформаторах, в той час як навантажувальні втрати в них становлять приблизно 2,5% від сумарних втрат.

На підстанціях, від яких одержують живлення споживачі першої та другої категорій надійності, як правило, встановлюють два або більше трансформаторів, які можуть працювати окремо чи паралельно. Одним з практичних способів зменшення втрат потужності в трансформаторах знижувальних підстанцій є забезпечення економічних режимів їх роботи шляхом вимкнення частини трансформаторів у режимах мінімальних навантажень [1-3].

Більш економічним, з огляду на оптимальний розподіл навантаження та зменшення втрат потужності, є режим паралельної роботи трансформаторів, хоча при цьому збільшуються струми короткого замикання. У випадку роздільної роботи трансформаторів потужність навантаження між ними потрібно розподілити так, щоб сумарні втрати потужності були мінімальними. Ці та інші заходи дають можливість підвищити ККД трансформаторів і зменшити видатки на оплату електроенергії.

У практичних розрахунках втрати в сталі та втрати короткого замикання трансформаторів приймають сталими. Ці параметри трансформаторів визначають з дослідів неробочого ходу і короткого замикання, причому втрати в сталі визначають за номінальної напруги на виводах обмотки ВН при розімкненій обмотці НН, а втрати короткого замикання – за номінального навантаження обмоток ВН і НН. Фактичне значення вхідної напруги трансформаторів може відрізнятися від номінальної напруги обмотки ВН, при цьому втрати потужності в сталі та навантажувальні втрати й коефіцієнт корисної дії трансформаторів будуть змінюватися. Тому з метою забезпечення економічного режиму роботи трансформаторів необхідно враховувати вплив вхідної напруги на їх енергетичні показники.

#### Мета та завдання досліджень

Метою досліджень є підвищення економічної ефективності роботи трансформаторів знижувальних підстанцій підприємств нафтогазової промислової галузі. Завданнями досліджень є аналіз залежності ККД від характеру зміни потужності навантаження та її величини, визначення оптимального коефіцієнта завантаження трансформатора, яке відповідає максимальному значенню ККД з врахуванням рівня напруги на його вході та оцінка економічної ефективності регулювання напруги при роботі трансформатора із заданим навантаженням.

#### Результати досліджень

Коефіцієнт корисної дії двообмоткового трансформатора, виражений через його номінальну потужність  $S_{НОМ}$  і коефіцієнт потужності навантаження  $\cos\varphi_2$ , визначають за формулою

$$\eta = \frac{K_3 S_{НОМ} \cos\varphi_2}{K_3 S_{НОМ} \cos\varphi_2 + \Delta P_{СТ} + \Delta P_M}, \quad (1)$$

де  $\Delta P_{СТ} = \Delta P_X$  – втрати потужності в сталі трансформатора, які прирівнюють до втрат неробочого ходу  $\Delta P_{X_2}$ ;

$\Delta P_M = \Delta P_K K_3^2$  – втрати потужності в міді трансформатора, які залежать від втрат короткого замикання  $\Delta P_K$  і коефіцієнта завантаження  $K_3$ ;

$\Delta P_X, \Delta P_K$  – паспортні значення втрат потужності неробочого ходу і короткого замикання трансформатора;

$K_3 = S_2/S_{НОМ}$  – коефіцієнт завантаження трансформатора;

$S_2$  – потужність навантаження трансформатора.

Проаналізуємо, як впливає напруга живлення на коефіцієнт корисної дії трансформатора залежно від величини його завантаження.

Втрати в сталі трансформаторів пропорційні квадрату наведеної ЕРС, яка наближено дорівнює напрузі на виводах їх первинних обмоток, так як втратою напруги в первинному колі трансформаторів можна знехтувати. Отже, у випадку зміни напруги на вході трансформаторів, втрати в сталі не залишаються сталими.

Як відомо, активну провідність трансформатора, яка характеризує втрати в сталі, визначають за номінальної напруги  $U_{ВН}$  на основних виводах обмотки ВН,

$$g_T = \Delta P_X / U_{ВН}^2. \quad (2)$$

Фактичні втрати в сталі залежать квадратично від вхідної напруги  $U_1$  обмотки ВН трансформатора

$$\Delta P_{ст.ф} = U_1^2 g_T = \left( \frac{U_1}{U_{ВН}} \right)^2 \Delta P_X = U_{1*}^2 \Delta P_X, \quad (3)$$

де  $U_{1*} = U_1 / U_{ВН}$  – відносне значення напруги на вході обмотки ВН.

Активний опір трансформатора, зведений до номінальної напруги обмотки ВН, розраховують за формулою

$$R_T = \frac{\Delta P_K U_{ВН}^2}{S_{НОМ}^2}, \quad (4)$$

при цьому навантажувальні втрати потужності в опорі  $R_T$  трансформатора залежать обернено пропорційно від вхідної напруги  $U_1$

$$\Delta P_{м.ф} = \frac{S_2^2}{U_1^2} R_T = \left( \frac{U_{ВН}}{U_1} \right)^2 \Delta P_K K_3^2 = \frac{1}{U_{1*}^2} \Delta P_K K_3^2. \quad (5)$$

З врахуванням (3), (5) коефіцієнт корисної дії трансформатора згідно з (1) можна записати у вигляді

$$\eta = \frac{K_3 S_{НОМ} \cos \varphi_2}{K_3 S_{НОМ} \cos \varphi_2 + U_{1*}^2 \Delta P_X + \frac{1}{U_{1*}^2} \Delta P_K K_3^2}. \quad (6)$$

Після перетворення (6)

$$\eta = 1 - \frac{U_{1*}^2 \Delta P_X + \frac{1}{U_{1*}^2} \Delta P_K K_3^2}{K_3 S_{НОМ} \cos \varphi_2 + U_{1*}^2 \Delta P_X + \frac{1}{U_{1*}^2} \Delta P_K K_3^2}. \quad (7)$$

Визначимо оптимальний коефіцієнт завантаження трансформатора, прирівнявши першу похідну  $d\eta / dk_3$  до нуля,

$$K_{3.опт} = U_{1*}^2 \sqrt{\frac{\Delta P_X}{\Delta P_K}}. \quad (8)$$

При заданому значенні напруги живлення  $U_{1*}$  максимальне значення ККД трансформатора згідно з (8) буде відповідати такій оптимальній потужності  $S_{2.опт}$ , за якої втрати в обмотках і втрати в сталі будуть однаковими,

$$U_{1*}^2 \Delta P_X = \frac{1}{U_{1*}^2} \Delta P_K \left( \frac{S_{2.опт}}{S_{НОМ}} \right)^2. \quad (9)$$

Трансформатори виготовляють з різним співвідношенням втрат  $\Delta P_K / \Delta P_X$  для того, щоб можна було забезпечити економічний режим роботи трансформаторів для середніх навантажень, рівних 50...70% від номінального навантаження. Відношення втрат  $\Delta P_K / \Delta P_X$  для сучасних трансформаторів напругою 6 (10) -35 кВ практично змінюється в межах від 2 до 4. Менші значення цього співвідношення відносяться до трансформаторів великої потужності з ефективнішим використанням за навантаженням, а більші значення – до трансформаторів меншої потужності з менш ефективним використанням за навантаженням.

Розглянемо такі режими роботи трансформатора:

1) повна потужність навантаження внаслідок компенсації реактивної потужності зменшується, активна потужність залишається сталою, в результаті коефіцієнт потужності підвищується;

2) активна потужність навантаження збільшується, а реактивна залишається сталою, при цьому повна потужність і коефіцієнт потужності збільшуються;

3) співвідношення між активною і реактивною потужностями змінюється так, що повна потужність залишається незмінною, а коефіцієнт потужності збільшується.

У таблиці 1 наведено результати розрахунку ККД трансформатора ТМ-100/10 за номінальної напруги на виводах первинної обмотки та різних режимів навантаження. Технічні параметри трансформатора:  $S_{НОМ} = 100$  кВ·А;  $U_{ВН} = 10$  кВ;  $U_{НН} = 0,4$  кВ;  $\Delta P_X = 0,305$  кВт;  $\Delta P_K = 1,97$  кВт.

Аналіз одержаних результатів свідчить, що незалежно від характеру та величини навантаження ККД трансформатора в усіх режимах збільшується при підвищенні коефіцієнта потужності.

Проаналізуємо залежність оптимального коефіцієнта завантаження трансформатора  $K_{3.опт}$  від їх його вхідної напруги. Згідно з (8) цей коефіцієнт залежить квадратично від напруги на вході трансформатора. Тому з метою зменшення втрат потужності та підвищення ККД трансформаторів рівні напруг в мережі живлення трансформаторів потрібно регулювати так, щоб при заданому навантаженні вони працювали з найвищим ККД.

У таблиці 2 наведено результати розрахунку залежності  $K_{3.опт}$  трансформатора ТМ-100/10 від його вхідної напруги. Як бачимо, напругу на вході трансформаторів потрібно підвищувати в режимах максимальних навантажень і знижувати в режимах мінімальних навантажень, тобто здійснювати зустрічне регулювання напруги.

На рисунку 1 наведено залежності ККД трансформатора від коефіцієнта його завантаження  $K_3$  для різних значень вхідної напруги.

У разі підвищення напруги на вході трансформатора (див. рисунок 1) його максимальний ККД зміщується у бік більших навантажень. Для сучасних трансформаторів втрати по-

Таблиця 1 – Результати розрахунку ККД трансформатора ТМ - 100/10 за номінальної напруги на його вході та різних режимів навантаження

Режим навантаження	$P_2$ , кВт	$Q_2$ , квар	$S_2$ , кВ·А	$\cos \varphi_2$	$K_3$	$K_{3\text{опт}}$	$\eta, \%$
1	50	40	64	0,78	0,64	0,39	97,8
	50	20	53,9	0,93	0,539		98,2
	50	0	50	1	0,5		98,4
2	30	40	50	0,6	0,5	0,39	97,4
	40	40	56,6	0,71	0,566		97,7
	50	40	64	0,78	0,64		97,8
3	30	40	50	0,6	0,5	0,39	97,4
	40	30	50	0,8	0,5		98
	50	0	50	1	0,5		98,4

Таблиця 2 – Залежність оптимального коефіцієнта завантаження трансформатора ТМ-100/10 від вхідної напруги

$U_{1*}$	0,8	0,85	0,9	0,95	1	1,05	1,1	1,15	1,2
$U$ , кВ	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12
$K_{3\text{опт}}$	0,252	0,284	0,318	0,355	0,393	0,432	0,476	0,52	0,566

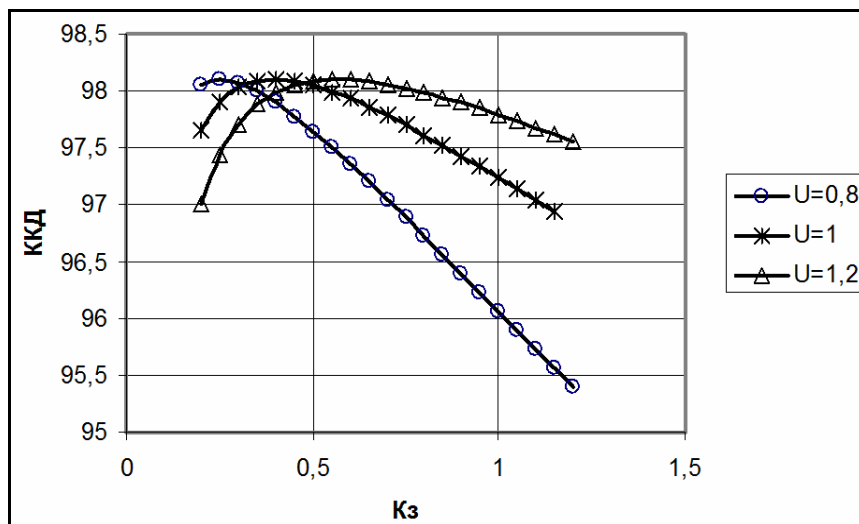


Рисунок 1 – Залежність ККД трансформатора від коефіцієнта його завантаження  $K_3$  за різних значень вхідної напруги

тужності в сталі значно менші за втрати короткого замикання, тому максимальні значення ККД відповідають малим коефіцієнтам завантаження, особливо при зниженій вхідній напрузі. Так, при зміні напруги на вході трансформатора від  $0,9U_{\text{ном}}$  до  $1,1U_{\text{ном}}$  оптимальний коефіцієнт завантаження  $K_{3\text{опт}}$  (див. таблицю 2) змінюється в межах від 0,318 до 0,476. Отже, для того, щоб забезпечити роботу трансформаторів з максимальним ККД, їх потрібно недовантажувати, що може виявитися економічно недоцільним, так як при цьому потрібно завищувати їх встановлену потужність, яка фактично буде використана неефективно. Зазвичай потужність трансформаторів на двотрансформаторних підстанціях вибирають з коефіцієнтом завантаження  $K_3 = 0,65 - 0,7$  (враховуючи їх допустиму перевантажувальну здатність у післяварійному режимі). Щоб передати задану потужність навантаження з максимальним ККД при

$K_{3\text{опт}} = 0,35 - 0,45$ , потрібно встановлену потужність трансформатора збільшити майже удвічі. Але при цьому зростуть втрати в сталі, хоча втрати в міді дещо зменшаться, тому вибір потужності та режиму оптимального завантаження трансформаторів вимагає техніко-економічного обґрунтування з врахуванням капітальних витрат на встановлення трансформаторів (чи реконструкцію підстанції з їх заміною), а також витрат на експлуатацію і оплату витрат потужності в трансформаторах. Під час порівняння можливих варіантів підвищення економічної ефективності роботи трансформаторів потрібно врахувати, що зменшення витрат потужності позитивно впливає на умови їх експлуатації, при цьому зменшується еквівалентна температура нагрівання обмоток, збільшується термін служби та надійність роботи трансформаторів [5].

Розрахунок показав, що при зміні  $K_3$  в межах від оптимального значення  $K_{3\text{опт}}$  до фак-

Таблиця 3 – Залежність втрат активної потужності та енергії в трансформаторі від вхідної напруги

$U$ , кВ	$U_*$	Втрати потужності в сталі, кВт	Втрати потужності в міді, кВт	Сумарні втрати потужності, кВт	Втрати електроенергії, кВт·год
9	0,9	0,247	1,192	1,438	12597
10	1,0	0,305	0,965	1,27	11125
11	1,1	0,369	0,797	1,116	10214

тичного значення  $K_3 = 0,7$  енергетичні показники роботи трансформатора можуть значно змінюватися. Так, наприклад, за номінальної напруги на вході трансформатора ТМ-100/10 і його роботі з коефіцієнтом завантаження  $K_3 = 0,7$  сумарні втрати потужності в трансформаторі збільшуються більш як удвічі порівняно з оптимальним коефіцієнтом завантаження  $K_{3,опт} = 0,393$ . Тому, при навантаженнях трансформаторів, більших від економічних, регулювання рівнів напруги в мережі живлення трансформаторів може виявитися ефективним заходом.

Визначимо економічну ефективність регулювання напруги на вході трансформатора ТМ-100/10 за фактичного значення  $K_3 = 0,7$  та зміни напруги в межах  $(0,9 \dots 1,1)U_{ном}$ . Річні втрати електроенергії в трансформаторі за рівномірного навантаження розрахуємо за відомою формулою

$$\Delta W_T = (U_*^2 \Delta P_x + 1/U_*^2 K_3^2) 8760. \quad (10)$$

Результати розрахунку втрат електроенергії наведені в таблиці 3.

Згідно з результатами розрахунку річні втрати електроенергії при заданому коефіцієнті завантаження  $K_3 = 0,7$  можна зменшити на 8,2%, підвищивши напругу на вході трансформатора до 11 кВ порівняно з номінальною напругою. У разі зниження напруги до 9 кВ відносно номінальної напруги обмотки ВН втрати електроенергії збільшаться на 13%. Отже, регулюючи величину вхідної напруги трансформаторів у мережі живлення, можна суттєво підвищити економічність їх роботи.

### Висновки

1. Коефіцієнт корисної дії трансформатора в усіх випадках збільшується з підвищенням коефіцієнта потужності навантаження незалежно від зміни його характеру та величини.

2. Оптимальний коефіцієнт завантаження трансформатора, який відповідає максимальному значенню ККД, залежить не тільки від його номінальних параметрів, а й значною мірою від його вхідної напруги.

3. Рівень напруги в мережі живлення трансформаторів потрібно регулювати так, щоб при заданому навантаженні трансформаторів вони працювали з найвищим ККД.

4. З метою зменшення втрат потужності в трансформаторах і підвищення їх ККД напругу на вході трансформаторів в режимах максимальних навантажень потрібно збільшувати, а в режимах мінімальних навантажень – зменшувати.

5. Максимальні значення ККД сучасних трансформаторів відповідають низьким коефіцієнтам завантаження, тому регулювання напруги на їх вході є одним з ефективних заходів підвищення економічності їх роботи.

### Література

1 Суходоля О. М. Питання енергозбереження в трансформаторах [Текст] / О. М. Суходоля // Электропанорама. – 2002. – №12. – С. 43-45.

2 Железко Ю. С. Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях [Текст] / Ю. С. Железко. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 176 с.

3 Поспелов Г. Е. Потери мощности и энергии в электрических сетях. [Текст] / Г. Е.Поспелов, Н. М. Сыч. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 216 с.

4 Свечарник Д. В. Резервы повышения эффективности трансформаторов [Текст] / Д. В. Свечарник, Д. Г. Нарешелашвили // Промышленная энергетика. – 1988. – №6. – С. 18-22.

5 T. H. Harrison and B. Richardson, "Transformer Loss Reduction," Session, Cigre 12-04, 1988.

6 Saleh A, Adly A, Fawzi T, Omar A, El-Debeiky S. Estimation and minimization techniques of eddy current losses in transformer windings. In: Proceedings of the CIGRE conference, Paris, France, August; 2002.

7 Калинин В. П. Влияние входного напряжения на изменение потерь мощности и Электроэнергии в силовых трансформаторах [Текст] / В. П. Калинин, Н. Д., Банин, Я. С.Бедерак // Промелектро. – 2009. – №3. – С. 43-46.

8 Романюк Ю. Ф. Практичний алгоритм розрахунку та аналіз технічних втрат електроенергії в розподільних електричних мережах 6-10 кВ [Текст] / Ю. Ф. Романюк, О. В. Соломчак // Енергетика і електрифікація. – 2002. – № 8. – С. 26-30.

Стаття надійшла до редакційної колегії  
13.10.14

Рекомендована до друку  
професором **Костишиним В.С.**  
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)  
професором **Николайчуком Я.М.**  
(Тернопільський національний економічний  
університет, м. Тернопіль)