

УДК 330.115.; 621.317.3

Р.Трембач¹, канд. техн. наук; П.Палайда²; Т.Яремчук²

¹ Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя,

² Тернопільська академія народного господарства

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЕНЕРГОЄМНИХ ОБ'ЄКТІВ З ПРИЙМАЧАМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ПРОМИСЛОВОЇ ЧАСТОТИ

Розглянуто задачу математичного моделювання ефективності функціонування енергоємних об'єктів, що містять приймачі електроенергії промислової частоти. Придільено увагу побудові цільової функції – мінімуму зведених річних витрат і системі обмежень. Удосконалено математичну модель, а також запропоновано методика, що дозволяє підвищити точність визначення техніко-економічних параметрів споживачів електроенергії.

Забезпечення ощадності електроенергії і матеріалів та високих еколого-економічних показників енергоємних об'єктів належить до проблем, важливість розв'язання яких на сучасному етапі підтверджується статусом державної політики і координується державними органами в усіх високорозвинених країнах (Великобританії, Німеччині, США, Франції, Японії) [1]. В умовах енергетичної кризи, постійного зростання цін на електроенергію особливу увагу слід приділяти її економії. Сьогодні енергозбереження країни вже стало проблемою національної безпеки [1], що зберігає свою актуальність, незважаючи на значний внесок в її розв'язання спеціалістів протягом останнього десятиріччя. Вона тісно переплітається з проблемами енергетики, технічного переоснащення і структурної перебудови всієї економіки.

Згідно з чинною методикою техніко-економічних розрахунків критерієм економічності варіанту в енергетиці, причому як для силових, так і для освітлювальних та опромінювальних приймачів електроенергії, є зведені витрати [2–10]. Їх зниження служить одним з найважливіших питань створення сучасних систем електроенергетики.

Нижче розглянуто питання побудови математичної моделі поставленого завдання щодо промислових енергоємних об'єктів з електроосвітлювальними пристроями. Проте викладки можна застосувати до об'єктів з іншими приймачами електроенергії, хоча навіть розгляд цієї окремо взятого завдання дуже важливим, адже витрати електроенергії на освітлення зараз становлять понад 20 відсотків від усієї електроенергії, що споживається у народногосподарському комплексі нашої держави.

Запишемо цільову функцію – мінімум зведених річних витрат на освітлення

$$Q = N_{on} \tau_2 \left(\frac{A + a}{\tau} n + \frac{\alpha \tau_2 P q n + 250(\Theta + M) + 1000 m_c B}{1000} \right) \rightarrow \min, \quad (1)$$

де N_{on} – загальна кількість освітлювальних приладів одного типу в освітлювальних установках об'єкта; P – потужність однієї лампи при наявній напрузі живлення, Вт; τ – номінальний термін служби джерел світла, год.; τ_2 – витрата ресурсу ламп на рік, год.; q – тариф на електроенергію, грн/(кВт · год); m_c – кількість чисток світильників за рік; A – ціна однієї лампи, грн; Θ – ціна одного освітлювального приладу, грн; M – вартість монтажу одного світильника, грн; a – вартість заміни однієї лампи, грн; B – вартість одного світильника, грн; α – коефіцієнт, що враховує втрати енергії у пускорегулювальних апаратах і в мережі [5, 8-12].

Однак у процесі роботи промислові енергоємні об'єкти, у тому числі з освітлювальними засобами, зазнають впливу факторів довкілля, різноманітних збурень технологічного процесу, напруги живлення. Серед наявних впливаючих факторів саме зміна параметрів напруги живлення найпомітніше впливає на роботу приймачів електроенергії, їх техніко-економічні характеристики, зведені витрати і точність їх визначення, що не відображено у (1). Це особливо стосується електроосвітлювальних та опромінювальних установок, адже передусім джерела світла та опромінення найкритичніше реагують на зміну параметрів напруги мережі [8, 10, 13-16]. Цим можна пояснити значні електромагнітну і технологічну складові економічних збитків, викликаних зміною параметрів напруги мережі і велику увагу до проблеми проектування та експлуатації систем електропостачання для правильного вибору методів і засобів поліпшення якості електроенергії як у нашій країні, так і за кордоном [17, 19]. Необхідність визначення зведених витрат виникає також для обґрунтування допускових значень показників якості електроенергії, при коректуванні наявних і виробленні нових стандартів якості електроенергії, зокрема промислової частоти 50 герц [18]. Важливо, що вже відомі в достатньому обсязі відповідні заходи, що дозволяють зменшити або врахувати вплив інших факторів, таких, як температура довкілля, тиск, кількість і частота увімкнень, форма кривої напруги тощо [2, 7, 8, 10, 12-16, 18, 20]. Однак завдання, пов'язане з визначальною впливною величиною – напругою живлення і зумовленими нею наслідками для оптимізації техніко-економічних показників та оцінки і моделювання ефективності функціонування енергоємних об'єктів з електричними приймачами промислової частоти, а також експлуатації та організації оптимального живлення – досі не розв'язане і не відображене у нормативній і науково-технічній літературі.

Тому охарактеризуємо особливості мінімізації зведених річних витрат на освітлення щодо, визначальної впливної величини - напруги живлення. Проте ці викладки можна застосувати до інших впливних величин, цільових функцій та промислових енергоємних об'єктів.

Запишемо залежність зведених річних витрат на освітлення від функції середньої квадратичної напруги живлення. Для цього виразимо техніко-економічні параметри освітлювальних засобів, що наліжать до виразу функції Q в (1) і залежать від середньої квадратичної напруги живлення. За даними нормативних документів, науково-технічної вітчизняної та зарубіжної літератури взаємозв'язок між параметрами освітлювальних пристроїв та напругою мережі описує степеневий ряд [2, 6, 8, 10-12, 14-16]

$$NN_1^{-1} = B_0 + \sum_{p=1}^n B_p (UU_1^{-1})^{m_p}, \quad (2)$$

де N_1, N - значення одного з параметрів пристрою для середньої квадратичної напруги живлення U_1 та відмінної від U_1 напруги живлення U ; B_0, B_p - безрозмірні коефіцієнти; n - скінченномірне число; m - показник степеня, що дорівнює цілому або дробовому числу, значення якого залежить від параметра пристрою і діапазону зміни середньої квадратичної напруги.

Для цього використовують значення параметрів, поданих, як правило, у нормативно-технічних документах. Середнє квадратичне відхилення похибки визначення параметрів знаходиться на рівні одиниць відсотків від номінального значення. Наприклад, для таких величин, як фотометричні, терміну служби джерел світла середнє квадратичне похибки становить у ліпшому випадку 5 % від номінального значення з довірчою ймовірністю 0,95.

При використанні (2) можливі такі варіанти: 1) середня квадратична напруга мережі не змінюється у часі. Тоді напруга U дорівнює середньому квадратичному значенню напруги мережі; 2) середня квадратична напруга мережі не постійна в часі, як на практиці [4, 8, 15, 16, 18, 19]. У цьому випадку під U розуміють еквівалентний

рівень напруги живлення $U_{ек}$, тобто напругу, яка, залишаючись незмінною за значенням, забезпечує величину значенням N :

$$U_{ек} = \left(\frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} (U_i U_1^{-1})^{m_p} dt \right)^{\frac{1}{m_p}} U_{1, p = \overline{1, n}}. \quad (3)$$

Встановлено [2, 5–12, 14–16], що при змінах напруги живлення, що лежать у діапазоні $\pm 10\%$ номінального значення, тобто у межах працездатності джерел світла та опромінення, зміну характеристик останніх можна визначити з похибкою до $\pm 1.2\%$, користуючись рівнянням (2) для $V_0 = 0$, $n = 1$, $V_p = 1$. При цьому N_1 - значення величини чи характеристики N для номінальної чи розрахункової напруги живлення. Далі під U_1 розумітимемо номінальну напругу живлення джерел світла та опромінення $U_{ном}$, що збігається з номінальною напругою мережі. Відповідно $N_1 = N$ і формула (2), виходячи з даних стандартів на освітлювальні лампи і джерела випромінювання та іншої нормативної і науково-технічної літератури для джерел світла та опромінення запишемо так:

$$N_i N_{ном}^{-1} = (U_i U_{ном}^{-1})^{m_p} dt, \quad p = 1. \quad (4)$$

де $N_{ном}$ - значення однієї з характеристик освітлювального засобу при номінальній середній квадратичній напрузі живлення $U_{ном}$. Для важливіших техніко-економічних характеристик освітлювальних пристроїв маємо: згідно із стандартами $m_p = \{13; 14\}$ для терміну служби вакуумних і газоповних ламп розжарення; $m_p = 3,2$ для терміну служби люмінесцентних джерел світла і розрядних ламп високого тиску типу ДРЛ. Якщо параметром є світловий потік, потік випромінювання, освітленість, опроміненість, експозиція, доза опромінення, світлова енергія, енергія випромінювання, то залежно від типу освітлювального чи опромінювального засобу справджується: $m_p = 1,2$ - для люмінесцентних ламп з індуктивним баластом і натрієвих ламп високого тиску; $m_p = 0,5$ - для люмінесцентних ламп з ємнісним баластом; $m_p = 3,6$ - для ламп розжарення; $m_p = 2,5$ - для розрядних ламп високого тиску. В [10] подано, що $m_p = \{1,95; 1,6\}$ для електричної потужності люмінесцентних ламп у комплекті з пускорегулювальними апаратами і ламп розжарення.

Але не лише для освітлювальних пристроїв існує залежність (2), що характеризує рівень їх піддатливості змінам параметрів напруги живлення. Перелік як величин, так і засобів, можна продовжити. Список можна доповнити такою важливою характеристикою, як термін служби ізоляції. Аналогічними залежностями (2) характеризуються силові приймачі електроенергії [13, 21], у тому числі електричні машини, а також пристрої обчислювальної, радіоелектронної, опромінювальної та інших технік. Так, для асинхронних двигунів серії 4А потужністю 1 кВт, що працюють з номінальним навантаженням, зміна напруги на його затискачах у межах $(0,9 \dots 1,1) U_{ном}$ викликає зміну коефіцієнта потужності від 0,71 до 0,85 [21]. До того ж саме встановленню залежності між напругою живлення і величинами та характеристиками електроспоживчих засобів присвячена низка фундаментальних робіт [21]. Ковзання асинхронного двигуна для зміни напруги мережі можна виразити співвідношенням (2) при $V_0 = 2$; $V_p|_{p=1} = - 2$;

$U_1 = U_{ном}$; $m_p|_{p=1} = 1$; $V_p|_{p=2} = 1$; $m_p|_{p=2} = 2$; $n = 2$ [21]. Збільшення струму статора асинхронного двигуна і споживаної ним реактивної потужності можна записати залежністю [21]:

$$\frac{I}{I_{ном}} = A_1^{-1} \left(\cos^2 \varphi_{ном} + B^2 \left((\alpha^2 A_1 - \chi_\alpha \cos \varphi_{ном})^{0,5} - A_2 \right) \sin^2 \varphi_{ном} \right)^{0,5}, \quad (5)$$

де A_1 виражається співвідношенням (2) при $U_1 = U_{ном}$; $B_0 = 2$; $n = 2$; $B_0 = -2$; $n = 2$; $B_{p|p=1} = -2$; $m_{p|p=1} = 1$; $B_{p|p=2} = 1$; $m_{p|p=2} = 2$; а для визначення коефіцієнта A_2 використовується ліва частина виразу (2) для $U_1 = U_{ном}$; $B_0 = 4$; $n = 4$; $B_{p|p=1} = -8$; $B_{p|p=2} = 8$; $B_{p|p=3} = -4$; $B_{p|p=4} = 1$; $m_{p|p=1} = 1$; $m_{p|p=2} = 2$; $m_{p|p=3} = 3$; $m_{p|p=4} = 4$.

Для підвищення точності визначення зведених витрат і техніко-економічних характеристик освітлювальних засобів шляхом корекції похибки від змін середньої квадратичної напруги живлення пропонується знаходити інтеграли за часом рівня середньоквадратичної напруги (ІЧССН), що описуються виразом

$$H_{mk} = \int_0^{\Delta t} (U_{ki} \cdot U_{nom}^{-1})^m dt. \quad (6)$$

Тут k - індекс для позначення кроку зміни середньої квадратичної напруги живлення; Δt - час, за який береться інтеграл, причому досить тривалий (хвилини, години, доби). Також з метою спрощення викладок і відповідно до виразу (4) і далі нехтуємо індексом "р".

При цьому, якщо m дорівнює значенню, що характеризує взаємозв'язок (4) між тривалістю горіння джерел світла і середньою квадратичною напругою живлення, то H_{mqk} дорівнює тривалості горіння ламп з урахуванням змін середньої квадратичної напруги живлення. Якщо ж (4) характеризує взаємозв'язок між іншими величинами (наприклад, електричними, світловими), то, використовуючи інформацію про ІЧССН (6), фактичні значення техніко-економічних характеристик джерел світла визначаємо за формулою:

$$N = \frac{H_{mk}}{\Delta t} N_{nom}. \quad (7)$$

Підставляючи у вираз цільової функції (1) фактичні значення техніко-економічних характеристик освітлювальних засобів, для визначення яких використовуємо ІЧССН (4), отримуємо

$$Q_k = Q(H_{mk}, m = \{m_{pj}, p = \overline{1, n}, j = \overline{1, s}\}), \quad (8)$$

де Q_k - зведені річні витрати на освітлення у режимі роботи освітлювальних засобів для k -го кроку регулювання середньої квадратичної напруги живлення, s - кількість залежних від середньої квадратичної напруги живлення техніко-економічних характеристик освітлювальних засобів, що належать до виразу цільової функції (1).

Проте за (8) ще не можна стверджувати, чи використовуються освітлювальні засоби ефективно, оскільки не відомо, чи є мінімальними зведені річні витрати на освітлення. Для розв'язання розглянутої задачі пропонується таке.

Запишемо вираз для ІЧССН H_{mq} , які належать до цільової функції, з врахуванням передбачуваних змін середньої квадратичної напруги живлення наприкінці k -го кроку. Враховуючи умову паралельного зміщення середньої квадратичної напруги живлення і використовуючи (6), маємо:

$$H_{m(k+1)} = \int_0^{\Delta t} (U_{ki} \cdot U_{nom}^{-1} + \Delta U_*)^m dt, \quad (9)$$

де $H_{m(k+1)}$ - ІЧССН, який функціонально зв'язаний з напругою живлення та техніко-економічними характеристиками освітлювальних засобів, для $(k+1)$ -го режиму роботи;

ΔU_* - відхилення напруги живлення від оптимального значення у відносних одиницях.

Розкладемо підінтегральні складові виразу в правій частині (9) у ряд Тейлора [22, 23]:

$$\int_0^{\Delta t} \left(U_{ki} \cdot U_{nom}^{-1} + \Delta U_* \right)^m dt = \int_0^{\Delta t} \left(U_{ki} \cdot U_{nom}^{-1} \right)^m dt + m \cdot \Delta U_* \int_0^{\Delta t} \left(U_{ki} \cdot U_{nom}^{-1} \right)^{m-1} dt + \frac{m(m-1)}{2!} (\Delta U_*)^2 \int_0^{\Delta t} \left(U_{ki} \cdot U_{nom}^{-1} \right)^{m-2} dt + \dots \quad (10)$$

Аналіз виразу (10) виявляє, що на основі ІЧССН

$$H_{mrk} = \int_0^{\Delta t} \left(U_{ki} \cdot U_{nom}^{-1} \right)^{m-r} dt, m = \{m_{pj}, p = \overline{1, n}, j = \overline{1, s}\} \quad (11)$$

у вказаному вище режимі роботи можна передбачити значення ІЧССН $H_{m(k+1)}$ (9), а отже, і значення техніко-економічних характеристик освітлювальних засобів, що належать до цільової функції (1), та значення зведених річних витрат на освітлення. Кількість ІЧССН H_{mrk} (11) залежить від показника степеня m , точності обчислення кожного ІЧССН $H_{mq(k+1)}$, техніко-економічного параметра освітлювальних засобів і зведених річних витрат на освітлення, а також від похибки визначення ІЧССН H_{mrk} (9).

Завдяки апріорно відомим ІЧССН H_{mrk} (11) та використанню залежностей (8) і (10) можна записати цільову функцію – мінімум зведених річних витрат на освітлення у вигляді

$$Q_{(k+1)} = Q \left(H_{mrk} \Big|_{r=0}, m \cdot \Delta U_* \cdot H_{mrk} \Big|_{r=1}, \frac{m(m-1)}{2!} (\Delta U_*)^2 H_{mrk} \Big|_{r=2}, m = \{m_{pj}, p = \overline{1, n}, j = \overline{1, s}\} \right) \rightarrow \min. \quad (12)$$

Порівнюючи (8) і (12), бачимо, що для визначення зведених річних витрат Q_k досить мати інформацію про ІЧССН, що враховують вплив середньої квадратичної напруги живлення на величини і техніко-економічні характеристики освітлювальних засобів, що належать до виразу функції критерію оптимізації, тобто H_{mk} (6). Це рівноцінно визначенню ІЧССН $H_{mrk} \Big|_{r=0}$ (11). Однак, якщо потрібно передбачити

значення зведених річних витрат $Q_{(k+1)}$, треба додатково знайти ІЧССН

$$H_{mrk} \Big|_{\{r\} \in \{0; >0\}} \quad (13)$$

Мінімізуючи зведені річні витрати на освітлення $Q_{(k+1)}$ згідно з (12), можна також знайти відхилення напруги ΔU_* від його оптимального значення, що використовується як сигнал керування у системах регулювання напруги живлення приймачів електроенергії промислової частоти енергоємних об'єктів. Шукаючи оптимальне значення цільової функції, враховують систему обмежень, встановлення яких залежить від поставленого завдання. Такими обмеженнями можуть бути нормований рівень освітленості або фотометричні, електричні та інші величини джерел світла, регламентовані діапазони зміни середньої квадратичної напруги живлення освітлювальних засобів, екологічні показники [3, 6, 7, 9–11, 15].

Слід відзначити суттєву відмінність даного підходу від інших, зокрема, описаного у монографії [24]. Справа в тому, що цільова функція може набирати неоднакових значень у різні моменти часу. Тому не доцільно говорити про єдине значення зведених витрат і, відповідно, шукати їх мінімум у поточний момент часу. Останнє викликане тим, що ця точка, справді існуючи, є миттєвим, постійно змінюваним параметром режиму.

Запропонована математична модель відрізняється від відомих тим, що зведені витрати визначають не в поточний момент часу, а за його інтервал. Рекомендації щодо вибору довжини цього інтервалу регламентовані, достатньо висвітлені в літературі та узагальнені у [25]. Ним може бути інтервал, протягом якого баланс навантажень вузла електричного навантаження і його основна схема достатньо постійні [26], наприклад: літній і зимовий періоди, але для значної річної зміни навантажень доцільно врахувати додатково осінній і весняний періоди [25]. Експлуатаційні режими мають відповідати нормальним і тривалим ремонтним схемам систем електропостачання об'єктів [25]. На сьогодні тривалість періоду досліджень обґрунтовано вважати 2 ... 4 доби, іноді до одного тижня [24, 27]. Тривалість досліджень впливу відхилень напруги мережі має бути наступна [25]: а) не менше як 2 доби (робочих і неробочих) - для підприємств з 5-денним робочим тижнем та вузлів енергосистем; б) не менше як 1 доба - для підприємств з неперервним виробництвом; в) не менше як 2 доби робочих та 1 доба неробоча - для всіх інших випадків. Завдяки визначенню ІЧССН за даний інтервал і дальшому використанню отриманої про них інформації для математичного моделювання ефективності функціонування енергоємних об'єктів, обладнаних приймачами електроенергії промислової частоти, шляхом мінімізації зведених річних витрат, можна говорити про постійність знайденого мінімального значення на інтервалах з вказаною довжиною у прогнозованому періоді.

The task of mathematical modelling of the functioning effectiveness of power-intensive plants, containing receivers of industrial frequency electric power, was under consideration. The attention was paid to the goal function construction - the minimum of the total annual expenditures and the system of limitations. The mathematical model is improved, and the technique allowing to increase the accuracy of technological parameters of the power customers, is suggested.

Література

1. Троценко Р. Програма енергозбереження для України // Діловий вісник. - 1996. - № 8 (27). - С. 18-19.
2. Анчарова Т.В. Об экономической эффективности применения ограничителей напряжения в промышленных осветительных установках // Межвузовск. сб. науч. тр. Моск. энерг. ин-та. - 1991. - № 7. - С. 143-147.
3. Воробьев А.И., Засорина В.П., Зельцбург Л.М., Ключев С.А. Развитие методики технико-экономических расчетов при проектировании освещения промышленных предприятий // Светотехника. - 1992. - № 4. - С. 18-21.
4. Глушков В.М., Грибин В.П. Экономия электроэнергии в осветительных установках. - М.: Энергоатомиздат, 1996. - 65 с.
5. Денисова Н.А., Левин С.И. Особенности определения экономической эффективности осветительных ламп в сфере эксплуатации // Сб. науч. тр. Всесоюзн. н.-и. ин-та источников света. - 1990. - Вып. 4. - С. 236-245.
6. Ключев С.А. Техничко-економические расчеты при проектировании осветительных установок // Светотехника. - 1991. - № 7. - С. 23-27.
7. Котельников О.И., Крахмалин И.Г., Солнцев Е.Б. Техничко-економическое обоснование мероприятий по улучшению качества электроэнергии // Проектирование и эксплуатация систем электроснабжения промышленных предприятий. - М.: МДНТП, 1989. - С. 77-82.
8. Кунгс Я.А., Твардовский П.М. Экономические предпосылки применения ограничителя напряжения в сетях электрического освещения промышленного предприятия // Промышленная энергетика. - 1986. - № 10. - С. 44-46.
9. Кунгс Я.А., Фаермарк М.А. Экономия электрической энергии в осветительных установках. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 160 с.
10. Справочная книга по светотехнике / Под ред. Ю.Б.Айзенберга. - М.: Энергоатомиздат, 1995. - 472 с.
11. Heuttner M. O wpływie trwalosci zarowek glownego szeregu na koszty lumengodziny // Przegland elektro-techniczny. - 1992. - 55. - N 7. - S. 336-339.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ. МАТЕМАТИКА. ФІЗИКА

12. Литвинов В.С. Принципы оптимизации параметров источников света массового применения // Сб. науч. тр. Моск. энерг. ин-та. - 1997. - Вып. 253. - С. 42-48.
13. Акимцев Ю.И. Влияние отклонений напряжения на работу электроприемников // Труды Всесоюз. науч.-техн. семинара «Рациональное и экономное использование электроэнергии в сельском хозяйстве». - М.: 1990. - С. 5-6.
14. Helbig E. Grundlagen der Lichtmesstechnik. - Leipzig: Akadem. Verlags. GEEST & PORTING K.-G., 1992. - 324 S.
15. Krochmann J. Messung von Beleuchtungsanlagen // Technik am Bau. - 1987. - N 8. - S. 691-694, 697.
16. Plewako J. Wahania napięcia w sieci oświetleniowej spowodowane przez odbiorniki elektryczne // Energetyka (PRL). - 1992. -26. - N 12. - S. 416-419.
17. Жежеленко И.В., Рабинович М.Л., Божко В.М. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях. - К.: Техніка, 1981. - 160 с.
18. Жежеленко И.В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. - М.: Энергоатомиздат, 1988. - 168 с.
19. Шидловский А.К., Гринберг И.П., Железко Ю.С. Контроль качества электроэнергии и требования к средствам измерения // Электричество. - 1982. - № 12. - С. 22-28.
20. Литвинов В.С., Эль-Ганайни М.М. Оптимизация параметров люминесцентных ламп для повышенной окружающей температуры // Светотехника. - 1993. - № 8. - С. 7-9.
21. Стульников Г.В. Влияние изменения напряжения на производительность механизмов и качество продукции в текстильной промышленности: Автореф.дис... канд-та техн. наук: 09.00.01 / Моск.энерг.ин-т. - М., 1993. - 20 с.
22. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. - М.: Наука, 1984. - 834 с.
23. Прудников А.П., Брычков О.А., Марычев О.И. Интегралы и ряды. - М.: Наука, 1981. - 800 с.
24. Аберсон М.Л. Оптимизация регулирования напряжения. - М.: Энергоатомиздат, 1995. - 160 с.
25. Инструктивные материалы Главгосэнергонадзора. - М.: Энергоатомиздат, 1983. - 400 с.
26. Маркушевич Н.С., Солдаткина Л.А. Качество напряжения в городских электрических сетях. - М.: Энергоатомиздат, 1996. - 256 с.
27. Колесниченко Б.В. Выбор рабочих ответвлений трансформаторов 6-10-20/0,23-0,4 кВ // Промышленная энергетика. - 1988. - № 5. - С. 15-18.

Одержано 06.11.2001 р.