

ЕТАЛОННА МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ЕКОНОМІЧНИХ ЕКВІВАЛЕНТІВ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ДЛЯ ПРОМИСЛОВИХ СХЕМ 750-10 кВ

Банін Д.Б., доц., к.т.н., Касперський Т.С., Роздоба М.Ю., магістранти
КПІ імені Ігоря Сікорського, кафедра автоматизації енергосистем

Вступ. Розрахунок економічних еквівалентів реактивної потужності (ЕЕРП) для Методики [1] плати за перетікання реактивної електроенергії між операторами системи з постачання та з розподілу електроенергії і їх споживачами потребує наявності алгоритмічних комп'ютерних засобів з характеристиками практичної ефективності (швидкість розрахунків і технологічна адресність) та бездоганна коректність і точність для споживачів. Якщо першу позицію забезпечують методи чисельного диференціювання в середовищі промислових комп'ютерних комплексів, наприклад, РАОТБ, то друга позиція повинна мати еталонну контрольно-методичну комп'ютерну підтримку.

Мета роботи. Розробка еталонного метода розрахунку часткових похідних сумарних втрат активної потужності по реактивній потужності вузлів для промислових розрахункових схем операторів системи з передачі та розподілу електроенергії в сучасних форматах енергоринку України та його комп'ютерна реалізація.

Матеріали та результати досліджень. Термін “промислова схема” відноситься до суб'єктів електроенергетики України, електричні мережі яких мають класи напруги 750/330/220/35/10 кВ та, які включають магістральні мережі енергосистем в структурі НЕК “Укренерго” та розподільні мережі операторів систем розподілу. Всі ці промислові схеми мають об'єми в сотні та тисячі вузлів та характеризуються параметрами мережі, що потребують складних алгоритмічних форм моделювання при розрахунку усталених режимів. Визначимо наступне:

1. Електрична мережа має різні рівні напруги, що реалізуються гілками схеми з моделями трансформаторів (автотрансформаторів) з регулюванням режиму напруги (РПН).

2. Можлива наявність трансформаторів поперечного регулювання напруги (наприклад, ВДТ), моделі яких функціонують з комплексними коефіцієнтами трансформації ($K_{та}+jK_{тр}$).

3. Електропостачання схеми виконується з ряду балансуєчих (опорних по нарузі) вузлів, вектора напруги яких різняться по модулю та по куту, щодо початку координат режимної системи.

4. Балансуєчі вузли можуть бути пов'язані транзитними трасами, в яких, як правило, мають місце зрівнювальні контурні струми (потоки потужностей).

5. У контурах, де є невірноважені коефіцієнти трансформації, діють шкідливі контурні перетікання потужності;

6. В гілках мережі моделюють поперечні провідності згідно П-подібній схеми заміщення, в вузлах можливі шунтувальні реактори, або провідності моделей навантажень;

7. В мережі промислових енергосистем можливі вузли з фіксацією модуля напруги за рахунок регулювання реактивної потужності.

Для вирішення задачі задіємо апарат матричної алгебри. Матриці будемо позначати великими літерами з префіксом “d” для діагональних матриць та індексом “j” для вектора-рядка, або індексом “i” для вектора-стовпця, якщо це необхідно. При наявності декількох балансуючих вузлів фундаментальне рівняння з повною матрицею провідностей перетворюємо у систему двох блочних рівнянь:

$$Y \cdot U = I = \begin{cases} Y_{BB} \cdot U_B + Y_{BN} \cdot U_N = I_B; & \text{(I)} \\ Y_{NB} \cdot U_B + Y_{NN} \cdot U_N = I_N; & \text{(II)} \end{cases} \text{,де}$$

$Y_{BB}, Y_{BN}, Y_{NB}, Y_{NN}$ - субматриці провідностей. Символ “B” (балансуючий) та “N” (навантажувальний) свідчать о відносинах рядків та стовпців елементів матриці до відповідних вузлів схеми;

U_B, U_N, I_B, I_N - відповідно вектори-стовпці напруги та струмів вузлів. Усі елементи матриці і векторів є комплексними числами. Спряжений комплекс позначимо символом “ $\hat{}$ ”.

Оскільки напруги U_N невідомі, математична форма (II) створює рівняння стану електричної мережі або її режиму:

$$U_N = U_0 + Z_{NN} \cdot I_N, \text{ де} \quad (1)$$

Z_{NN} - матриця опорів мережі, обернена до матриці провідностей Y_{NN}^{-1} ;

U_0 - вектор приведених напруг балансуючих вузлів до рівня конкретного навантажувального вузла, який в матричній формі дорівнює:

$$U_0 = -Z_{NN} \cdot Y_{NB} \cdot U_B$$

При моделюванні навантажень потужностями $S = P + jQ$ та залежності $I = \hat{S} / \hat{U}$, а також з урахуванням поперечних провідностей вузлів Y_S , рівняння стану перетворюється у нелінійну форму:

$$U_N = U_0 + Z_{NN} \cdot d\hat{U}_N^{-1} \cdot \hat{S}_N + dY_S \cdot U_N^2 \quad (2)$$

Якщо в математичну форму (I) підставити значення (2), потім помножити обидві частини рівняння (I) на вектор-рядок спряжених балансуючих напруг \hat{U}_B^j , та відняти це значення від сумарних навантажень усіх вузлів схеми SNN, отримаємо повне рівняння балансу з урахуванням струмів навантаження,

контурних зрівноважувальних струмів і струмів від вузлових провідностей. Формат цього рівняння це сума скалярів:

$$\hat{SSN} - \hat{SSB} = D\hat{SS} = \hat{SSN} - D\hat{SK} - \hat{SBN} - \hat{SBY}, \text{ де} \quad (3)$$

SSB - сумарна вхідна потужність усіх балансуєчих вузлів;

SSN - сумарна споживча потужність усіх навантажувальних вузлів;

DSS - сумарні втрати потужності по усім можливим причинам;

DSK - втрати в мережі, спричинені незрівноваженими контурними струмами;

SBN - складова потужності SSB , що забезпечує "транспорт" потужності з урахуванням втрат на покриття навантажень;

SBY - складова потужності SSB , що здійснює "транспорт" потужності з урахуванням втрат на покриття "споживання" електроенергії у поперечних провідностях ліній, трансформаторів і шунтів;

Наведені компоненти розраховуємо згідно формул:

$$\begin{aligned} \hat{SSB} &= \hat{UB}_j \cdot IB; & \hat{DSK} &= \hat{UB}_j \cdot (YBB \cdot UB + YBN \cdot U0); \\ \hat{SSY} &= \hat{UB}_j \cdot YBN \cdot ZNN \cdot dYS \cdot UN^2; & \hat{SBN} &= \hat{UB}_j \cdot YBN \cdot ZNN \cdot d\hat{UN}^{-1} \cdot \hat{SN}; \end{aligned} \quad (4)$$

Визначимо, що згідно наведених вимог (п.1) усі блочні матриці (YBB, YNB, YBN, YNN) враховують коефіцієнти трансформації [2]. Поперечні провідності трансформаторів та шунтів можуть бути враховані в повній матриці Y згідно:

$$Y \cdot U = I + I_Y = I + d\hat{YS} \cdot U; \quad (Y - d\hat{YS}) * U = I$$

При цьому складова SBY з балансуєчого рівняння зникає. Крім цього характеристика DSK не залежить від реактивних потужностей ні від напруги UN . Позначивши:

$$\hat{UB} \cdot YBN * ZNN = Tj,$$

маємо рівняння стану режиму та балансу потужностей для подальшого диференціювання сумарних втрат реактивної потужності:

$$DSS = 1j \cdot SN - \hat{T}j \cdot dUN^{-1} \cdot SN; \quad (5)$$

Втрати

$$W = UN - U0 - ZNN \cdot d\hat{UN}^{-1} \cdot \hat{SN} = 0; \quad \text{Рівняння}$$

стану

Оскільки функція втрат є складною (залежить від реактивної потужності та напруги, $U = U' + jU''$ задіємо відому математичну формулу:

$$dDSS / dQ_k = (\partial DSS / \partial Q_k) + (\partial DSS / \partial U'_k) \cdot (\partial U_i / \partial Q_k) + (\partial DSS / \partial U''_k) \cdot (\partial U''_i / \partial Q_k) \quad (6)$$

Власні похідні $(\partial DSS / \dots)$ - розраховуються по формулам:

$$\begin{aligned} \partial DSS / \partial Q_k &= j(1j - \hat{T}j \cdot dUN^{-1}), \\ \partial DSS / \partial U'_k &= \hat{T}j \cdot dUN^{-2} \cdot DSN, \quad \partial DSS / \partial U''_k = j \cdot \hat{T}j \cdot dUN^{-2} \cdot DSN \end{aligned} \quad (7)$$

Проведемо підстановку власних часткових похідних (7) у загальний вираз (6):

$$\partial DSS / \partial Q_k = j(1j - \hat{T}j \cdot dUN^{-1}) + \hat{T}j \cdot dUN^{-2} \cdot DSN \cdot (\partial U_i / \partial Q_k); \quad (8)$$

Щоб визначити $\partial U_i / \partial Q_k$ продиференціюємо рівняння стану як складну, неявну та багатовимірну функцію

$$dWi / dQ_k = (\partial Wi / \partial Q_k) + (\partial Wi / \partial U'_k) \cdot (\partial U'_i / \partial Q_k) + (\partial Wi / \partial U''_k) \cdot (\partial U''_i / \partial Q_k) \quad (9)$$

Власні похідні $(\partial Wi / \dots)$ - розраховуються по формулам:

$$\begin{aligned} \partial Wi / \partial Q_k &= jZNN \cdot d\hat{U}N^{-1}, \\ \partial Wi / \partial U'_k &= d1 + ZNN \cdot d\hat{U}N^{-2} \cdot d\hat{S}N, \\ \partial Wi / \partial U''_k &= j(d1 - ZNN \cdot d\hat{U}N^{-2} \cdot d\hat{S}N). \end{aligned} \quad (10)$$

Виконаємо підстановку цих похідних в загальний вираз (9):

$$jZNN \cdot d\hat{U}N^{-1} + (\partial U_i / \partial Q_k) + ZNN \cdot d\hat{U}N^{-2} \cdot d\hat{S}N \cdot (\partial \hat{U}_i / \partial Q_k) \quad (11)$$

В даному виразі (11) невідома похідна представлена як комплексна матриця у прямому та спряженому вигляді. З допомогою послідовності алгебраїчних перетворень можливо визначити вираз $(\partial U_i / \partial WQ_k)$, а підставивши його у вираз (8) маєм кінцевий результат.

$$\begin{aligned} dDSS / \partial Q_k &= -j[1j - \hat{T}j \cdot dUN^{-2} \cdot d\hat{S}N \cdot \\ &\cdot (d1 - ZNN \cdot d\hat{U}N^{-2} \cdot d\hat{U}N^{-2} \cdot d\hat{S}\hat{N}NN \cdot dUN^{-2} \cdot dSN)^{-1} \cdot ZNN \cdot \\ &\cdot d\hat{U}N^{-1} \cdot (d1 + d\hat{U}N^{-1} \cdot d\hat{S}N \cdot \hat{Z}NN \cdot dUN^{-1})]. \end{aligned} \quad (12)$$

Розроблена методика реалізована у режимному середовищі Z_REGIN. Контроль коректності розрахунків проводиться на декількох тематичних прикладів. Три з них приведені на рис. 1,2,3. На першій схемі маємо замкнутий

контур з незрівноваженими комплексними коефіцієнтами трансформації. Другий приклад включає в себе набір радіусів з чотирьохма балансуючими вузлами. Третя схема має два балансуючих вузла з транзитом зрівноважувальних струмів та в схемі були задіяні чотири класи напруги 110/35/10/0.4кВ.

Для оцінки ефективності розрахунків ЕЕРП в промислових мережевих об'єктах вибрана регіональна схема Закарпаттяобленерго об'ємом в 784 вузла. Аналіз коректності проводиться шляхом порівняння з розрахунками ЕЕРП методами чисельного диференціювання (МЧД) – класичним і приближеним, який використовує малий нахил залежності $\Delta P = f(Q)$. Використовуємо формули МЧД:

$$\partial \Delta P / \partial Q = (dP^+ - dP^-) / (2 \cdot dQ), \text{ або } \partial \Delta P / \partial Q = (dP^+ - dP^0) / dQ, \text{ де}$$

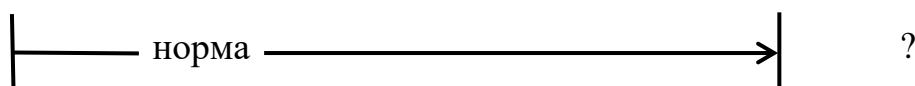
dQ - регульований для класа напруги крок диференціювання;

dP^0, dP^+, dP^- - втрати в трьох близьких режимах в точці диференціювання і з приростами реактивної потужності $\pm dQ$.

Для формального порівняння розрахунків ЕЕРП видаються максимальне (ERmax) і середнє (ERmid) значення ЕЕРП, максимальне відхилення по відношенню з класичними МЧД, а також розрахунковий час(time). Скорочені результати розрахунків приведені на рис. 4. Відзначимо, що у контрольних прикладах DPDQw, DPDQb, DPDQt максимальне та середнє значення ЕЕРП, що контролюється згідно промислової точності 10^{-4} , мають однакові значення для усіх реалізованих методах (МЧД – класичний, МЧД – приближений), але метод ЕТАЛОН відмічає наявність і максимальне значення похибок MaxDep. Для промислової схеми Закарпаттяобленерго використання методу МЧД-пр викликає сумнів. Аналіз наведений у таблиці 1.

Таблиця 1 – Контроль похибок методів чисельного диференціювання

Схема	ERmax	ERmid	МЧД-кл	МЧД-пр
DPDQw	0.0438	0.0369	0	$0.3 \cdot 10^{-5}$
DPDQb	0.2441	0.1357	$0.5 \cdot 10^{-8}$	$0.3 \cdot 10^{-4}$
DPDQt	0.1242	0.0673	$0.5 \cdot 10^{-8}$	$0.4 \cdot 10^{-4}$
DPDQ_ZAK	0.1683	0.0320	$0.4 \cdot 10^{-8}$	$1.7 \cdot 10^{-4}$



Розрахунок ЕЕРП виконувався для вузлів, де $P, Q \neq 0$. Слід звернути увагу на квадратичну залежність часу розрахунку для матричного методу ЕТАЛОН, але свої функції він виконує.

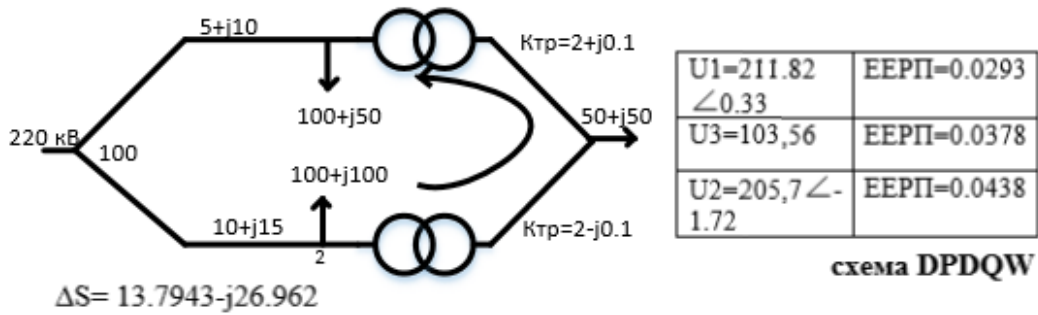


Рисунок 1 – Контрольний приклад з комплексними Ктр

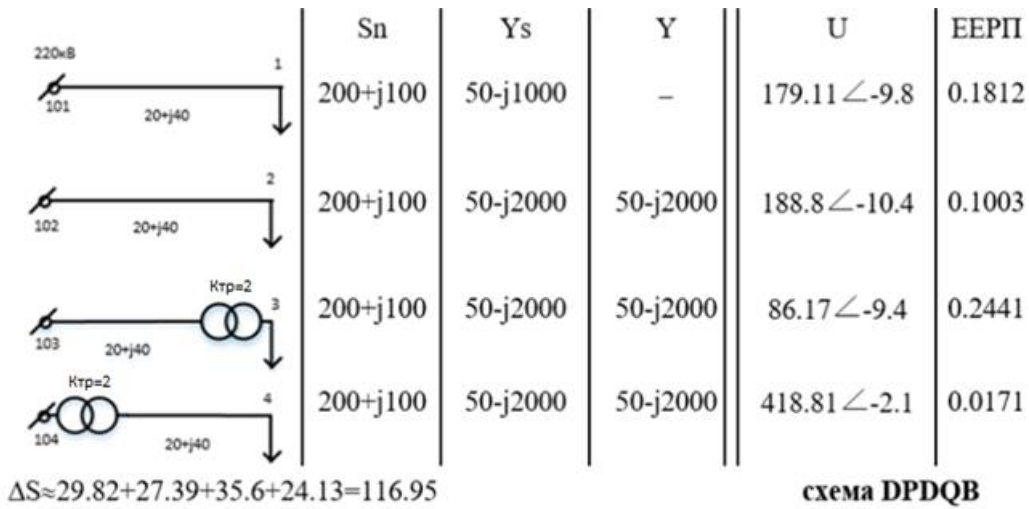


Рисунок 2 – Контрольний приклад з автономними БП

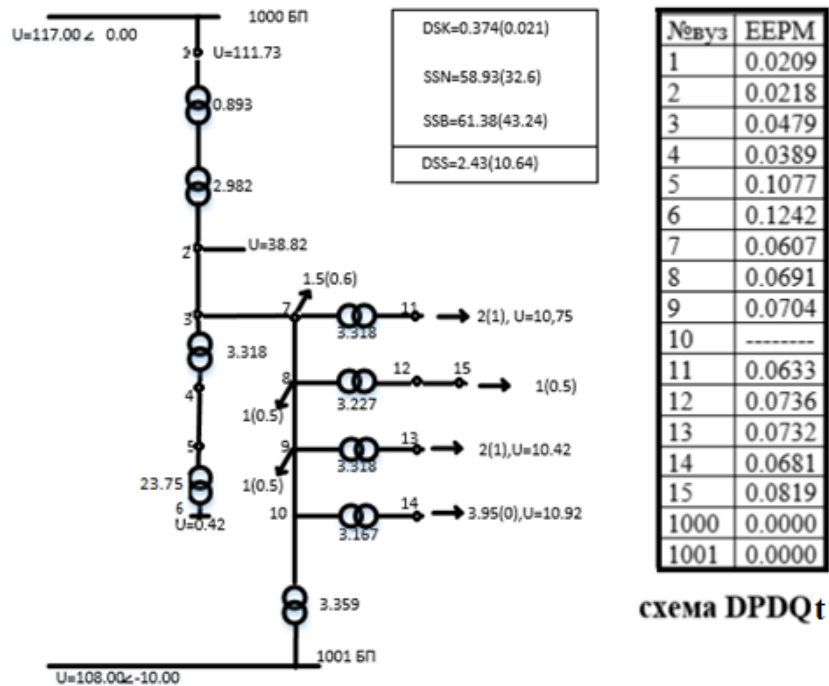


Рисунок 3 – Контрольний приклад БП з транзитним з'язком. $U=110/35/10/0.4$ кВ

```

***** (Z_REGIM) File= C:\P_ZALIK\A_ROZDOBA\2020_Z\DPDQw KP= 4 *****
=====
МЧД-Кл ERmax=0.0438(2) ERmid=0.0369(3) MAXdep=0.000000000(0) time= 0.025(100)
МЧД-Пр ERmax=0.0438(2) ERmid=0.0369(3) MAXdep=0.000031664(3) time= 0.015(100)
ЕТАЛОН ERmax=0.0438(2) ERmid=0.0369(3) MAXdep=0.000000000(3) time= 0.012(100)
***** (Z_REGIM) File= C:\P_ZALIK\A_ROZDOBA\2020_Z\DPDQb KP= 8 *****
=====
МЧД-Кл ERmax=0.2441(3) ERmid=0.1357(4) MAXdep=0.000000000(0) time= 0.062(100)
МЧД-Пр ERmax=0.2441(3) ERmid=0.1357(4) MAXdep=0.0000338182(2) time= 0.037(100)
ЕТАЛОН ERmax=0.2441(3) ERmid=0.1357(4) MAXdep=0.000000051(6) time= 0.023(100)
***** (Z_REGIM) File= C:\P_ZALIK\A_ROZDOBA\2020_Z\DPDQt KP= 18 *****
=====
МЧД-Кл ERmax=0.1242(6) ERmid=0.0673(14) MAXdep=0.000000000(0) time= 0.637(100)
МЧД-Пр ERmax=0.1243(6) ERmid=0.0673(14) MAXdep=0.0000367306(7) time= 0.322(100)|
ЕТАЛОН ERmax=0.1242(6) ERmid=0.0673(14) MAXdep=0.000000056(7) time= 0.378(100)

***** (Z_REGIM) File= C:\P_ZALIK\A_ROZDOBA\2020_Z\DPDQ_ZAK KP= 784 *****
=====
МЧД-Кл ERmax=0.1683(751) ERmid=0.0320(279) MAXdep=0.000000000( 0) time= 3.676(1)
МЧД-Пр ERmax=0.1683(751) ERmid=0.0320(279) MAXdep=0.0001689912(718) time= 1.684(1)
ЕТАЛОН ERmax=0.1683(751) ERmid=0.0320(279) MAXdep=0.0000004167(272)time=342.836(1)
SpectrEERM:0.1683*0.1515*0.1346*0.1178*0.1010*0.0841*0.0673*0.0505*0.0337*0.0168*
: 2 * 0 * 4 * 3 * 8 * 9 * 22 * 43 * 95 * 93 *

```

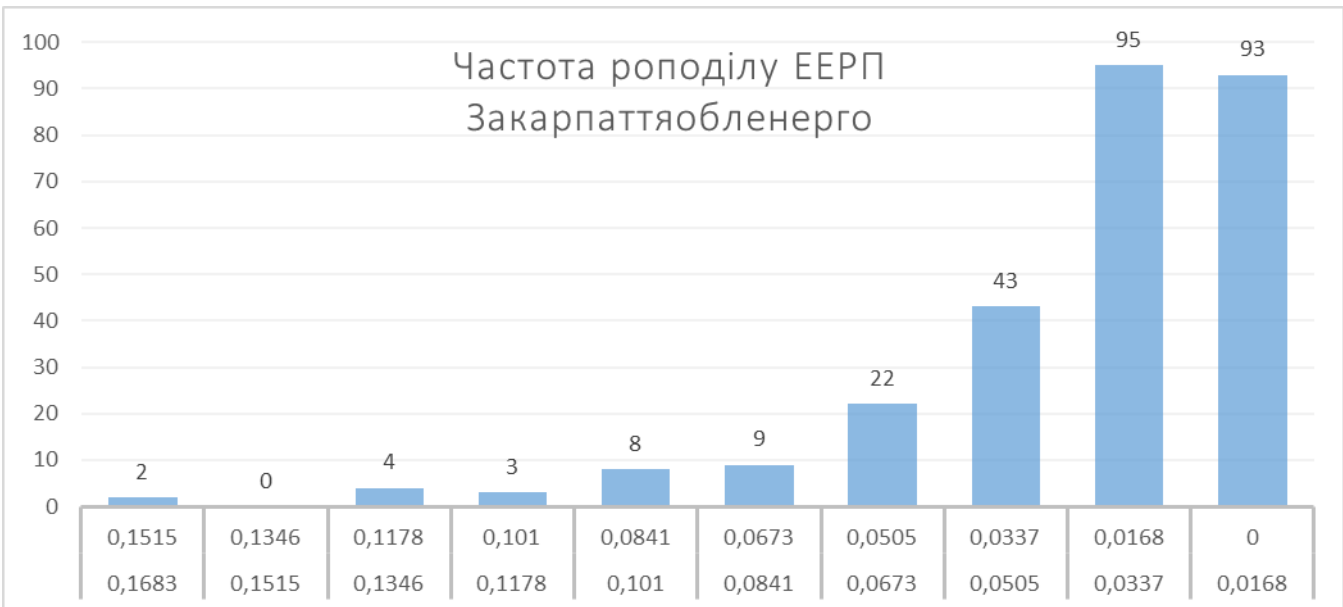


Рисунок 4 – Результат дослідження коректності методу та програми розрахунку ЕЕРП для промислових схем

Висновки. Розроблений метод розрахунку ЕЕРП може використовуватися як еталон для аналізу рівня похибок в швидкодіючих методах чисельного диференціювання для мереж промислових суб'єктів в електромережі.

Перелік посилань

1. Методика обчислення плати за перетіканням реактивної електроенергії, затверджена наказом Міністерства енергетики та вугільної промисловості України 06.08.2018 за №87, зареєстрована Міністерством юстиції України 08.04.2018 за №392/31844
2. Алгоритмізація та програмування електроенергетичних задач. Моделі, методи, алгоритми і програми для промислових комп'ютерних комплексів [Електронне видання]: навч. посіб. / Д. Б. Банін, М. Д. Банін, А. В. Гнатовський. – К.: НТУУ "КПІ", 2016. – 104 с.