

РОЗДІЛ 1. КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИМИ СИСТЕМАМИ

УЗАГАЛЬНЕНИЙ АЛГОРИТМ ВРАХУВАННЯ ОБМЕЖЕНЬ ПРИ ФІКСАЦІЇ НАПРУГ ДЛЯ ЗАДАЧ МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ СИСТЕМОУТВОРЮЮЧИХ І ЖИВЛЯЧИХ МЕРЕЖ 750-110 кВ ЕНЕРГОСИСТЕМ

Хижняк В.А., магістрант, Банін Д.Б., к.т.н., доцент
КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра автоматизації енергосистем

Вступ. Створення інформаційної бази нормальних режимів енергосистем України згідно нормативним часовим зрізам (зимовий-літній, максимум-мінімум) виконується відповідними диспетчерськими службами НЕК Укренерго і пов'язано з балансуванням даних вимірювань та моделюванням режимів складнозамкнених розрахункових схем. При цьому, як правило, задіяні моделі фіксації модулів напруги (U_f) і алгоритми врахування обмежень (Q_{\min} , Q_{\max}) на генераторних шинах електростанцій і у вузлах регулювання міжсистемних перетоків. Параметри розрахункових моделей приведені в табл. 1 (K_p , K_k , K_b , K_f – відповідно загальна кількість вузлів, контурів, балансуючих вузлів та вузлів з фіксацією модулів - ФМ).

Таблиця 1 – Параметри схем енергосистем (зимовий максимум 2018 р.)

	ЕЕС НЕК	Центр	Дніпро	Захід	Півд.-Захід	Північ	Південь
K_p	878	630	351	574	629	1483	385
K_k	450	66	240	105	50	206	259
K_b	5	1	1	5	4	1	1
K_f	81	0	110	17	9	31	60

При розробці інших проблемно-орієнтованих розрахункових схем для технологічних чи оптимізаційних задач необхідно збереження балансних умов, розрахованих для даного часового зрізу по міжсистемним перетоках, по втратам активної потужності, по напругам і, звісно, по характеристикам джерел реактивної потужності, які визначені моделями фіксації напруг.

Мета роботи. Ціллю даної роботи є розробка і дослідження узагальненого алгоритму врахування обмежень в задачі фіксації напруг, що забезпечує адекватність вказаних балансних умов, для метода Ньютона в середовищі з матрицею опорів Z [1]. Розробка призначена для розрахунків перших часткових похідних втрат по реактивній потужності (РП) $\partial \Delta P / \partial \Delta Q$ (економічний еквівалент РП) [2] у комплексних розрахункових схемах конкретних енергосистем зі схемою НЕК з її джерелами реактивної електроенергії. Параметри моделей комплексних схем представлені в табл. 2.

Таблиця 2 – Параметри комплексних розрахункових схем енергосистем (зимовий максимум 2018 р.). Схеми розроблені ГНДЛ при ФЕА «КПШ»

	НЕК Центр	НЕК Дніпро	НЕК Захід	НЕК Півд.-Захід	НЕК Північ + Донбас	НЕК Південь
K_p	1143	775	1016	1116	1900	745
K_k	445	450	48	434	493	440
K_b	11	11	12	11	11	11
K_f	40	40	40	40	40	40

Матеріали і результати досліджень. Для експериментальних досліджень виберемо розрахункову схему VarLF (рис. 1). Тут маємо фрагмент мережі 110 кВ, де для вузлів 90, 91, 92, що генерують в мережу по 70 МВт активної потужності, сформовані яруси гілок з приблизно однаковими параметрами та заданими режимними характеристиками. Так в ярусі вузла 90 (1, 2, 3, 4, 5) маємо однакове навантаження, рівні опори і коефіцієнти трансформації, але у вузлі 1 фіксується $U_f = 10.01$, а в інших $U_f = 10.00$. Ярус вузла 91 (11, 12, 13, 14, 15) при усіх рівних характеристиках ($Z = 1 + j50$, $P_{ген} = 20$, $U_f = 6.3$) має неврівноважений коефіцієнт трансформації $K_T = 17.000$ для вузла 11, хоча для інших вузлів $K_T = 17.778$. Однакові умови роботи генераторів у вузлі 92 ($P_{ген} = 20$) порушені у вузлі 6 опором $X = 0.001$, який на два порядки менше ніж в інших вузлах ярусу (7, 8, 9, 10).

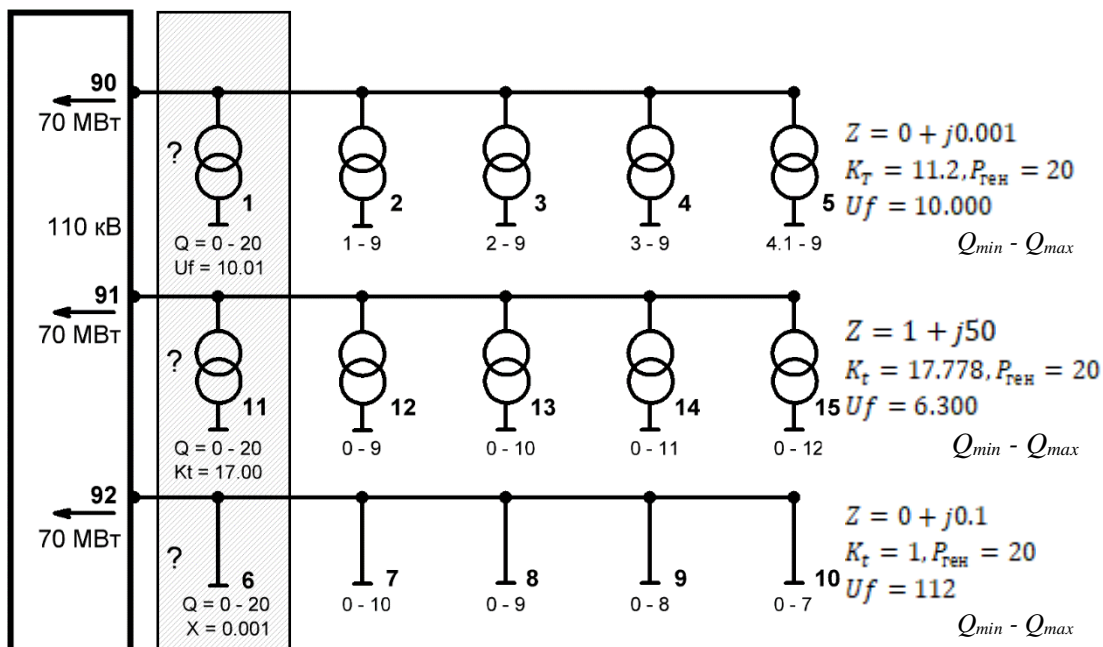


Рисунок 1 – Фрагмент експериментальної розрахункової схеми VarLF з асиметричними ярусами генеруючих шин

На перший погляд, незначна асиметрія наведених ярусів, де фіксуються модулі напруг у 15 вузлах розрахункової схеми VarLF, призводить до значних зрівнювальних перетікань реактивної потужності. Для обмеження потоків Q_f введені допустимі межі Q_{lim} (Q_{min} , Q_{max}). Їх врахування обов'язково має привести до результату, де з 15 вузлів ФМ певна кількість буде переведена в список з порушеними обмеженнями. Цей процес переводу вузлів зі шкали ФМ в шкалу навантажувальних вузлів позначатимемо $ScF \rightarrow ScN$, а отриманий список NameLimF.

Елементарне рішення по конкретному кроку $ScF \rightarrow ScN$ приймається в загальному ітераційному процесі Ньютон за контрольною умовою $Q_f < Q_{min}$ або $Q_f > Q_{max}$. Проте, виявляється, що в результаті можна отримати різні режимні результати з різною кількістю вузлів в списку переходу $ScF \rightarrow ScN$, якщо змінювати порядок кроків цього процесу. Для моделювання варіантних ситуацій в роботі розроблений спеціальний алгоритм, де черговість переводу

Var.	1	2	3	4
F/Lkof	0.999	0.900	0.700	0.100
1	В-20	В-20	В-20	В-20
2	Н-1	-2.369	-2.377	Н-1
3	Н-2	-2.369	-2.377	Н-2
4	Н-3	Н-3	Н-3	Н-3
5	Н-4	Н-4	Н-4	Н-4
6	В-20	В-20	В-20	В-20
7	-4.974	-4.817	-4.844	-5.009
8	-4.974	-4.817	-4.844	-5.009
9	-4.974	-4.817	-4.844	-5.009
10	-4.974	-4.817	-4.844	-5.009
11	-0.449	-0.354	Н-0	Н-0
12	В-9	В-9	В-9	В-9
13	В-10	В-10	В-10	В-10
14	В-11	В-11	В-11	В-11
15	-11.368	-11.269	-11.456	-11.607
dP	29.046	28.636	28.667	29.026
Кіл	9	7	8	10

Рисунок 2 – Варіанти режимів для різних значень LimKof

елементарний алгоритм переводу вузлів ФМ в навантажувальні недостатній для отримання однозначного рішення.

Сформований список NameLimf для вузлів ФМ, де в ітераційному процесі зафіксовані обмеження («В» чи «Н»), необхідно проаналізувати на предмет доцільності повернення їх в склад діючих ФМ. Будемо позначати цей процес $ScN \rightarrow ScF$. Для обґрунтування вибору таких вузлів розглянемо можливу залежність напруги від реактивної потужності $U = f(Q_{ген})$, яку будемо розглядати на певному віддаленні ітераційного процесу від точки включення в список NameLimF. Для аналізу потрібні модуль поточної напруги U_M , напруга фіксації U_f , допустимі межі реактивної потужності $Q_{ген}^{min} \div Q_{ген}^{max}$, факт зміни

вузла залежить від величини порушеного обмеження $|Q_{lim} - Q_f|$, від діапазону обмежень $(Q_{max} - Q_{min}) / 2$ і від коефіцієнта регулювання LimKof ($0.999 \div 0.001$), що регулює порядок заповнення списку NameLimF. Результати досліджень режимів експериментальної схеми показані на рис. 2, де для всіх 15 вузлів ФМ наведені чотири варіанта коефіцієнта LimKof = 0.999, 0.900, 0.700, 0.100. Вузли, що переведені в навантажувальні згідно процесу $ScF \rightarrow ScN$ виділені жирним шрифтом, вказана межа Q_{lim} («В» – верхній, «Н» – нижній), наведені Q_f для діючих ФМ, а також представлені значення втрат активної потужності ΔP . Як видно, маємо режими з різними втратами і різними кількостями вузлів в списку $ScF \rightarrow ScN$. Таким чином,

напруги для процесу $ScN \rightarrow ScF$ ($dU = U_M - U_f$) і відповідний прогноз потрібної реактивної потужності $Q_{ген}^n$.

На рис. 3 показана залежність $U = f(Q)$, проведена лінія U_f та на осі Q визначений діапазон обмежень. Оскільки вузли знаходяться в складі списку NameLimF, рухаючись від точки $Q_{ген}^{max}$ визначаємо напругу U_M , а потім, зміщуючись до напруги U_f , отримуємо прогнозоване значення $Q_{ген}^n$. Виявляється, що в даних умовах $Q_{ген}^n$ входить в допустимі межі по реактивній потужності. Значить, маємо вірогідність того, що даний вузол після повернення $Scn \rightarrow Scf$ залишиться діючим вузлом ФМ. Таким чином, можна сформулювати умову: якщо маємо обмеження по верхній межі («В») і $dU > 0$ ($U_M > U_f$), крок $ScN \rightarrow ScF$ має бути ефективним. Аналогічно аналізується ситуація щодо $Q_{ген}^{min}$. Аналіз приводить до висновку: якщо маємо обмеження по нижній межі («Н») і $dU < 0$ ($U_M < U_f$) крок $ScN \rightarrow ScF$ є доцільним. Після виконання кроку $ScN \rightarrow ScF$ вузол зі списку NameLimF виключається.

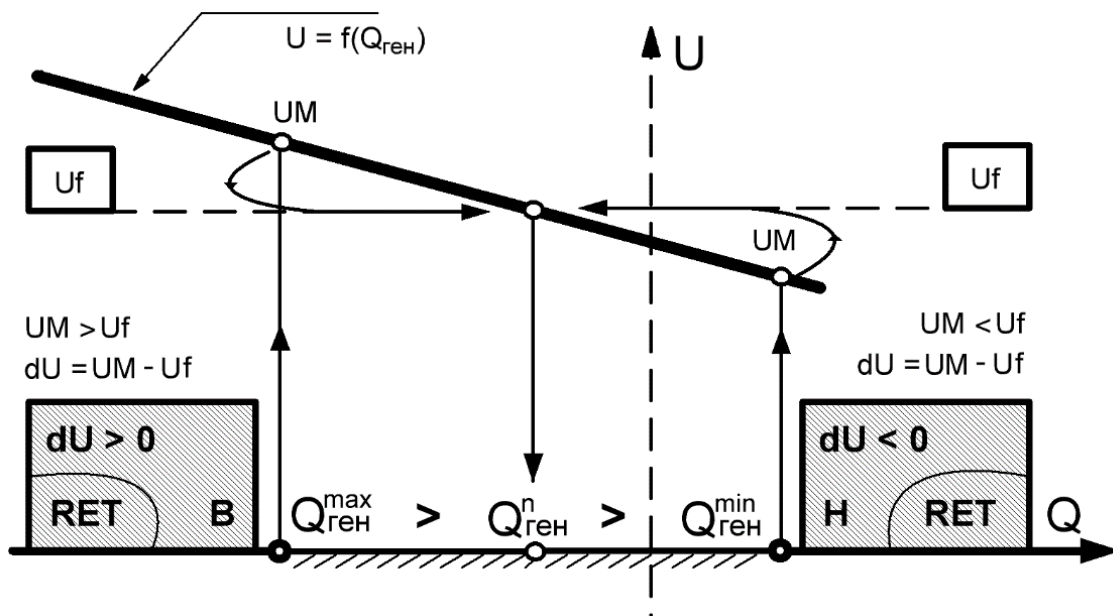


Рисунок 3 – Обґрунтування вибору вузлів в списку NameLimF для контрольного повернення $ScF \rightarrow Scn$

Загальний ітераційний процес (ITER Ньютона) представлено на рис.3. З метою стабілізації збіжності врахування обмежень по РП для вузлів ФМ починається з тимчасової затримки (K_i – кількість ітерацій затримки). Процес Ньютона, що в звичайних умовах повинен мати гладкий графік збіжності квадратичної форми, переривається сплесками збільшення нев'язок (S_{nt}), що виникають згідно з реалізацією кроків ($E_1, E_2, E_3 \dots$) та $ScN \rightarrow ScF$ ($R_1, R_2, R_3 \dots$). Після кожного кроку також задіяні затримки (K_e, K_r) щоб не діяло помилкове завершення процесу ITER щодо точності (E_{ps}). В алгоритмі врахування обмежень (рис. 4) процес $ScN \rightarrow ScF$ починає діяти після умови $S_{nt} < E_{ps}$, а загальне завершення доповнюється вимогою відсутності у списку NameLimF вузлів, що мають ознаку «R». Цей відредагований список є результатом дії розробленого алгоритму та розглянутого ітераційного процесу.

Відзначимо, що чисельне значення параметрів затримки (K_i , K_e , K_r) регулюються в командному файлі програми.

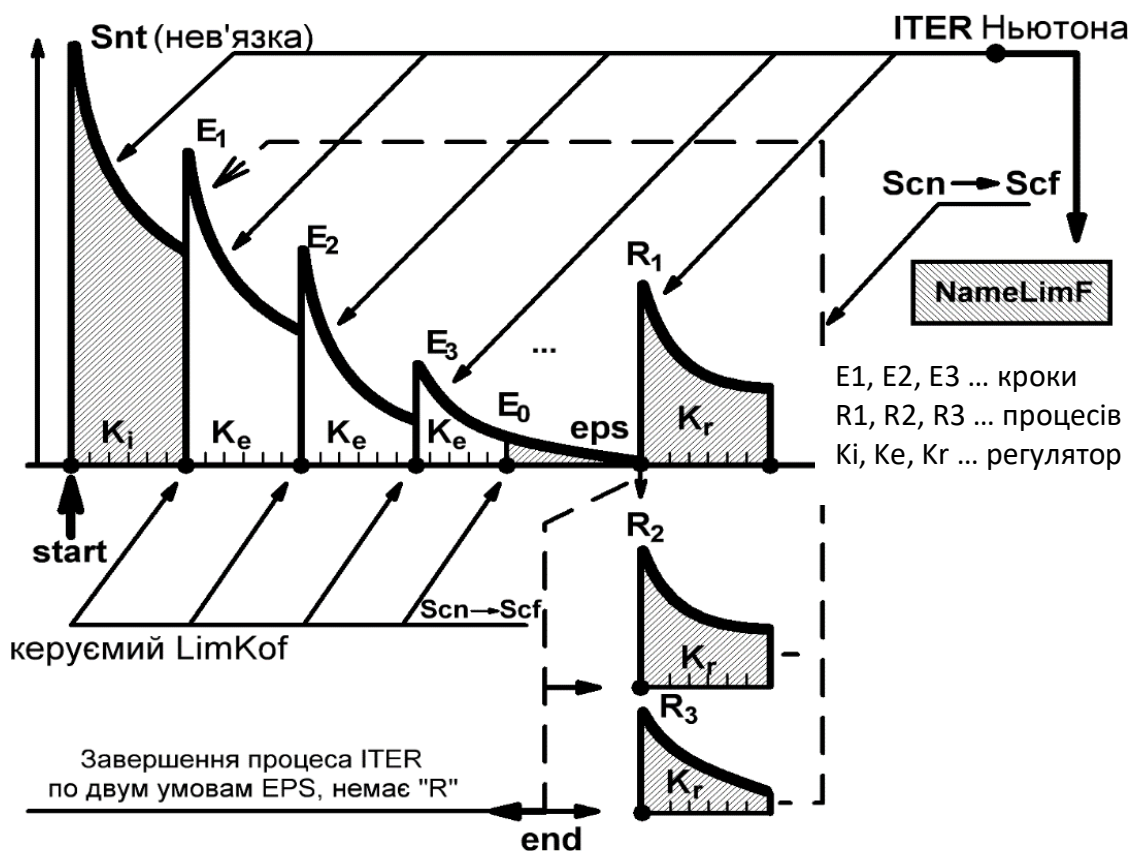


Рисунок 4 – Повний ітераційний процес Ньютона

Документація процесу наведена на рис. 5. Розрахунок виконано для схеми VarLF при умовах $Eps = 10^{-6}$, $K_i = 3$, $K_e = K_r = 1$, $LimKof = 0.1$, де спочатку у список NameLimF включено 10 вузлів, а саме 1, 2, 3, 4, 5, 6, 11, 12, 13, 14. П'ять з них мають ознаку «R», та рекомендуються до повернення до складу діючих вузлів ФМ. Операція RETURN All ScN → ScF виконує цю вимогу (у списку залишається п'ять вузлів), але 4, 5 знову повертаються у NameLimF. Завершальна таблиця (рис. 5) для семи вузлів свідчить про збіжність загального ітераційного процесу, оскільки в ній відсутні вузли з ознакою «R». Аналогічний результат маємо для інших варіантів LimKof (рис. 2).

Розрахунки режимів зимового максимуму 2018 р. згідно розрахункових схем, наведених у табл. 1, 2 виконувались за допомогою загальновідомих комп'ютерних комплексів (ГрафСКАНЕР, РАОТВ) [3] та учбового комплексу Z-Regim (NFL), де реалізовані алгоритми, що розглянуті у цій статті. Для Z-Regim були задані умови $Eps = 10^{-6}$, $K_i = 10$, $K_e = 2$, $LimKof = 0.9$, $Preg = 20$ (програмний ключ). Схеми Північ розраховувались з ключем $Preg = 21$, що реалізує процес ScN → ScF послідовно по одному вузлу, що мають ознаку «R».

***** (Z_REGIM) File= C:\...\VarLF *****

```
=====
LIM * 1   Scf ==> Scn   1 *
LIM * 2   Scf ==> Scn   2 *
LIM * 3   Scf ==> Scn   3 *
LIM * 4   Scf ==> Scn   4 *
LIM * 5   Scf ==> Scn   5 *
LIM * 6   Scf ==> Scn   6 *
LIM * 7   Scf ==> Scn  11 *
LIM * 8   Scf ==> Scn  12 *
LIM * 9   Scf ==> Scn  13 *
LIM * 10  Scf ==> Scn  14 *
ENDENDEND 14   0.000001 *****
LIMIT FixU KlimF=10 LimKof=0.0010 Ki= 3 Ke= 1 eps=0.0000010000
=====
  2     2  Qlim=  1.000 H  UM=  9.862554  UF=  10.0000000 R
  3     3  Qlim=  2.000 H  UM=  9.862555  UF=  10.0000000 R
  4     4  Qlim=  3.000 H  UM=  9.862555  UF=  10.0000000 R
  5     5  Qlim=  4.100 H  UM=  9.862556  UF=  10.0000000 R
  7    11  Qlim=  0.000 H  UM=  6.281239  UF=   6.3000000 R
===== RETURN ALL Scn ==> Scf
```

```
LIM * 6   Scf ==> Scn   4 *
LIM * 7   Scf ==> Scn   5 *
ENDENDEND 26   0.000002 #####
```

```
                KP= 24 KL= 25 KK= 10 KB= 1 KF= 7
LIMIT FixU KlimF= 7 LimKof=0.0010 Ki= 3 Ke= 1      eps=0.000001
=====
  1     1  Qlim= 20.000 B    UM= 10.000014  UF= 10.010000
  2     4  Qlim=  3.000 H    UM= 10.000001  UF= 10.000000
  3     5  Qlim=  4.100 H    UM= 10.000001  UF= 10.000000
  4     6  Qlim= 20.000 B    UM= 111.995879  UF= 112.000000
  5    12  Qlim=  9.000 B    UM=  6.244656  UF=  6.300000
  6    13  Qlim= 10.000 B    UM=  6.269165  UF=  6.300000
  7    14  Qlim= 11.000 B    UM=  6.293490  UF=  6.300000
***** time=0.0040( 1) *****
```

ПОТРЕБЛЕНИЕ	390.0000	211.0000
ГЕНЕРАЦИЯ	-300.0000	-112.7293
ПОТОК БП	-118.6357	-181.8551
ПОТЕРИ SSS	28.6357	83.5844
БАЛАНС СХМ	<u>-0.0000</u>	<u>-0.0000</u>

Рисунок 5 – Документація процесів ScF → ScN → ScF для схеми VarLF

Таблиця 3 – Результати розрахунків режимів (зимовий максимум 2018 р.)

	ЕЕС НЕК	Центр	Дніпро	Захід	Півд.- Захід	Північ*	Південь
ΔP	659.239	139.649	266.878	117.490	92.827	204.721	460.517
$K_{\text{таб}}$	19	–	13	3	1	16	15
Комент	Результати: ГрафСКАНЕР = РАОТВ = Z-Regim (NFL)						

*Північ – РАОТВ не збігається, ГрафСКАНЕР $E_{ps} = 0.1$ ($\Delta P = 199$, $K_{\text{таб}} = 20$)

Таблиця 4 – Результати розрахунків режимів комплексних схем

	НЕК Центр	НЕК Дніпро	НЕК Захід	НЕК Півд.- Захід	НЕК Північ+ Донбас	НЕК Південь
ΔP	693.235	670.923	670.606	665.808	684.815	661.334
$K_{\text{таб}}$	6	9	7	8	5	8
Комент	Результати: ГрафСКАНЕР = РАОТВ = Z-Regim (NFL)					

Висновки. 1. Розроблений алгоритм у двоетапному процесі $ScF \rightarrow ScN \rightarrow ScF$ забезпечує єдине режимне рішення.

2. Програмна реалізація узагальненого алгоритму включена до складу учбового комплексу Z-Regim (NFL).

3. Результати розрахунків, що виконані за допомогою програми Z-Regim (NFL), відповідають розрахункам промислових комп'ютерних комплексів ГрафСКАНЕР і РАОТВ.

Перелік посилань

1. 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.

2. Банін Д. Б. Економічні еквіваленти реактивної потужності. Математичний та чисельний аналіз. / Банін Д. Б., Яндульський О.С., Банін М.Д. – Промелектро. – 2004. -№1. – с. 22-23.

3. Банін Д. Б. Розрахунок та пофідерний аналіз складових технологічних витрат електроенергії в мережах 10(6)/0.4 кВ ВАТ ЕК «Хмельницькобленерго» за допомогою програмного комплексу РАОТВ. / Банін Д. Б., Банін М.Д., Луців П.Д. – Электрические сети и системы. – 2010. – с. 46-67.