

**Вінницький національний технічний університет  
Факультет електроенергетики та електромеханіки  
Кафедра електричних станцій і систем**

Кваліфікаційна робота на здобуття ступеня магістра:  
**ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОМПЕНСАЦІЇ  
РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ У РОЗПОДІЛЬНИХ  
МЕРЕЖАХ**

Науковий керівник: д.т.н., проф. Кулик В.В.

Підготував: ст.гр. ЕСМ-17м Кражай В.О

## Актуальність теми дослідження

Втрати електричної енергії у струмопровідних частинах і магнітних системах електричної мережі, що зумовлені перетіканням реактивних струмів, негативно впливають на техніко-економічні показники роботи електропередавальних організацій та споживачів електроенергії, і в кінцевому результаті ведуть до нераціонального використання енергетичних і матеріальних ресурсів.

Серед факторів негативного впливу перетікання реактивної потужності електромережами особливе місце займає збільшення втрат електроенергії. Пояснюється це відносною простотою його оцінювання в грошовому вигляді. Тому на підставі виділення додаткових втрат електроенергії від потоків реактивної потужності й оптимізації останніх з метою зменшення втрат побудована методика компенсації реактивної потужності (КРП).

### **Недоліки чинної методики компенсації реактивної потужності:**

- відсутність взаємопов'язаних рішень для енергопостачальних компаній, споживачів та власників РДЕ, приєднаних до їх електромереж;
- не врахування ряду важливих економічних аспектів, що стосуються функціонування споживачів та розосереджених джерел у мережах енергопостачальних компаній;
- неадекватність зміни економічних еквівалентів реактивної потужності (ЕЕРП) у випадку приєднання до електромереж нових суб'єктів енергоринку, особливо таких, що мають на балансі засоби генерування активної та реактивної енергії;
- неможливість повноцінного врахування наслідків генерування активної та реактивної енергії у споживача. »

## Мета та задачі дослідження

**Мета і задачі дослідження.** Метою магістерської роботи є підвищення ефективності функціонування розподільних електромереж за рахунок оптимізації перетікань реактивної потужності.

Відповідно до вказаної мети в роботі розв'язуються такі **основні задачі**:

- аналіз стану компенсації реактивних навантажень в електричних мережах енергопостачальних компаній та її методичного забезпечення;
- аналіз існуючих засобів компенсації реактивної потужності;
- проведення розрахунків по компенсації реактивної потужності у Вінницьких міських мережах;
- вдосконалення алгоритму визначення ЕЕРП на підставі методу визначення коефіцієнтів чутливості втрат потужності та методу ідентифікації коефіцієнтів форми графіків реактивних перетікань в ЕМ.

**Об'єктом дослідження** магістерської роботи є нормальні режими розподільних електричних мереж з джерелами реактивної потужності.

**Предмет дослідження** – методи і засоби аналізу та оптимізації перетікань реактивної потужності в розподільних електричних мережах з джерелами КРП.

# Наслідки транспортування надлишкової реактивної потужності



# Визначення економічно обґрунтованих рівнів компенсації реактивної потужності на підставі оптимізації економічних еквівалентів реактивної потужності

Для визначення оптимальних рівнів компенсації реактивної потужності у вузлах електромережі з огляду на забезпечення максимального економічного ефекту у вигляді зменшення витрат ЕК на обслуговування перетікань реактивної потужності використано математичну модель:

$$B = \sum_{i \in N_{KY}} Q_{KYi} \cdot B_0 + \left\{ \begin{array}{l} \sum_{i \in N_{СП}} [D_i (Q_{Hi} - Q_{KYi})] + \\ \sum_{i \in N_{PDE}} [D_i (Q_{PDEi} - Q_{KYi})] + \\ \sum_{i \in N_{ТП}} [D_i (Q_{ТПi} - Q_{KYi})] \end{array} \right\} \cdot \Pi_0 t \rightarrow \min$$

Враховуючи простоту та наочність цільової функції можна сформулювати принцип формування оптимального рівня компенсації реактивної потужності в ЕМ за економічним критерієм: для забезпечення мінімуму витрат на обслуговування перетікань реактивної потужності необхідно зменшувати вхідну реактивну потужність за рахунок КРП доцільно у вузлах ЕМ, для яких  $D_i \Pi_0 t - B_0 > 0$

$$RENT_i = \frac{D_i \Pi_0 t}{B_0} > 1$$

де  $RENT_i$  – за певних умов чисельно дорівнює рентабельності капіталовкладень у розміщення засобів компенсації реактивної потужності у  $i$ -му вузлі. Вище абсолютне значення  $RENT_i$  говорить про більші потенційні можливості даного вузла щодо зменшення витрат на обслуговування перетікань реактивної потужності в ЕМ.

## Практичні аспекти впровадження джерел КРП в електричні мережі. Аналіз технічних втрат електроенергії в Вінницьких міських електричних мережах 10 кВ

Для виконання розрахунків використовувалася програма «ВТРАТИ», що розроблена на кафедрі електричних станцій та систем ВНТУ. Виконано розрахунки втрат електроенергії за прогнозом на грудень 2017 року для двох станів: для поточного стану ЕМ 10 кВ та для ЕМ у яких були встановлені засоби компенсації реактивної потужності.

Таблиця 1 – Основні результати розрахунку втрат потужності для фрагменту Вінницьких електричних мереж 10 кВ

Підстанція	Фидер	$\Delta W_{\text{лп, кВт год}}$	$\Delta W_{\text{тр, кВт год}}$	$\Delta W_{\text{сум, кВт год}}$	$\Delta W_{\text{сум, \%}}$
Всі підстанції	Всі	341017,7	694085,64	1035103	3,36
ТП "Західна"	Всі	59979,52	129226,38	189205,9	2,43
ТП "Західна"	Ф-156	3880,25	10094,83	13975,09	1,73
ТП "Західна"	Ф-157	533,96	1434,42	1968,38	0,56
ТП "Західна"	Ф-158	296,39	1534,22	1830,61	0,68
ТП "Західна"	Ф-165	636,18	3924,97	4561,14	1,27
ТП "Західна"	Ф-167	31367,9	13807,28	45175,17	3,19
ТП "Західна"	Ф-169	0	1620,56	1620,56	1,3
ТП "Західна"	Ф-170	0	3510,77	3510,77	1,39
ТП "Західна"	Ф-177	49,08	2145,46	2194,55	2,66
ТП "Західна"	Ф-168	39,35	5655,73	5695,08	33,87
ТП "Західна"	Ф-187	4456,15	15943,55	20399,7	2,6
ТП "Західна"	Ф-155	4662,11	9876,47	14538,58	2,11
ТП "Західна"	Ф-152	558,56	8644,85	9203,41	2,46
ТП "Західна"	Ф-171	2961,99	9881,79	12843,78	1,92
ТП "Західна"	Ф-166	429,46	6311,28	6740,74	2,07
ТП "Західна"	Ф-185	4585,98	12823,59	17409,57	2,68
ТП "Західна"	Ф-150	5246,71	12863,95	18110,66	3,76
ТП "Західна"	Ф-163	275,46	9152,67	9428,13	7,59
ТП "Промислова"	Всі	59249,63	132682,38	191932	3,24
ТП "Промислова"	Ф-273	489,59	5343,66	5833,25	3,53
ТП "Промислова"	Ф-263	6011,98	13970,24	19982,22	2,86
ТП "Промислова"	Ф-259	5082,14	19015,79	24097,93	4,16
ТП "Промислова"	Ф-262	21845,77	30611,24	52457,02	4,23
ТП "Промислова"	Ф-253	15049,6	18285,92	33335,52	3
ТП "Промислова"	Ф-257	507,2	6358,62	6865,82	1,68
ТП "Промислова"	Ф-265	4485,5	13247,92	17733,42	2,66
ТП "Промислова"	Ф-247	2074,44	11455,95	13530,4	3,12

Підстанція	Фидер	$\Delta W_{\text{лп, кВт год}}$	$\Delta W_{\text{тр, кВт год}}$	$\Delta W_{\text{сум, кВт год}}$	$\Delta W_{\text{сум, \%}}$
ТП "Промислова"	Ф-243	3703,39	14393,04	18096,43	2,9
ТП "Східна"	Всі	13099,29	34798,59	47897,89	3,51
ТП "Східна"	Ф-87	2221,35	13840,64	16061,99	3,19
ТП "Східна"	Ф-44	10877,95	20957,95	31835,9	3,69
ТП "Нова"	Всі	106124,6	141859,78	247984,4	5,28
ТП "Нова"	Ф-111	32434,44	20025,12	52459,56	4,57
ТП "Нова"	Ф-110	15789,68	22996,49	38786,17	5,9
ТП "Нова"	Ф-113	25123,19	21598,75	46721,94	4,77
ТП "Нова"	Ф-107	7951,97	28871,03	36822,99	7,36
ТП "Нова"	Ф-106	20004,78	17883,85	37888,62	4,15
ТП "Нова"	Ф-101	4820,57	30484,54	35305,12	7,06
ТП "Центральна"	Всі	32583,5	77074,28	109657,8	3,09
ТП "Центральна"	Ф-5	1323,88	10541,15	11865,03	2,08
ТП "Центральна"	Ф-11	634,09	9169,77	9803,85	1,55
ТП "Центральна"	Ф-13	2894,77	14122,16	17016,94	2,66
ТП "Центральна"	Ф-8	19089,34	16370,03	35459,37	3,71
ТП "Центральна"	Ф-7	8641,42	26871,17	35512,59	4,71
ТП "Південна"	Всі	55663,18	107531,17	163194,4	2,94
ТП "Південна"	Ф-30	10224,66	17028,86	27253,52	3,16
ТП "Південна"	Ф-23	727,46	5369,02	6096,48	1,57
ТП "Південна"	Ф-305	1835,93	11693,91	13529,85	2,8
ТП "Південна"	Ф-35	291,34	2669,39	2960,74	1,82
ТП "Південна"	Ф-36(л2)	26919,55	32885,01	59804,56	3,77
ТП "Південна"	Ф-22	7665,39	17256,01	24921,4	2,6
ТП "Південна"	Ф-303	890,21	9494,29	10384,51	2,14
ТП "Південна"	Ф-36(л1)	7108,62	11134,66	18243,29	2,88
ТП "Північна"	Всі	12461,69	60467,54	72929,23	5,2
ТП "Північна"	Ф-206	461,58	5571,71	6033,29	2,12
ТП "Північна"	Ф-204	10518,37	40678,12	51196,49	7,71
ТП "Північна"	Ф-201	1481,74	14217,7	15699,44	3,47
ТП "Технологічна"	Всі	1856,29	10445,51	12301,8	2,16
ТП "Технологічна"	Ф-400	1856,29	10445,51	12301,8	2,16

# Аналіз структури технічних втрат електроенергії в Вінницьких міських електричних мережах 10 кВ

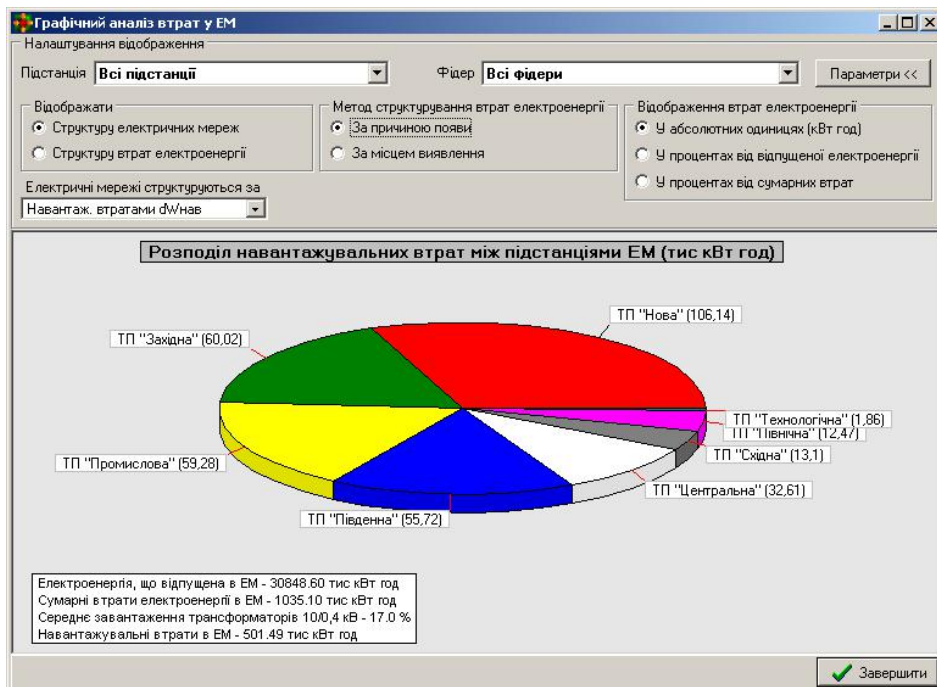


Рисунок 1 – Структурування живильних підстанцій за навантажувальними втратами у приєднаних мережах 10 кВ

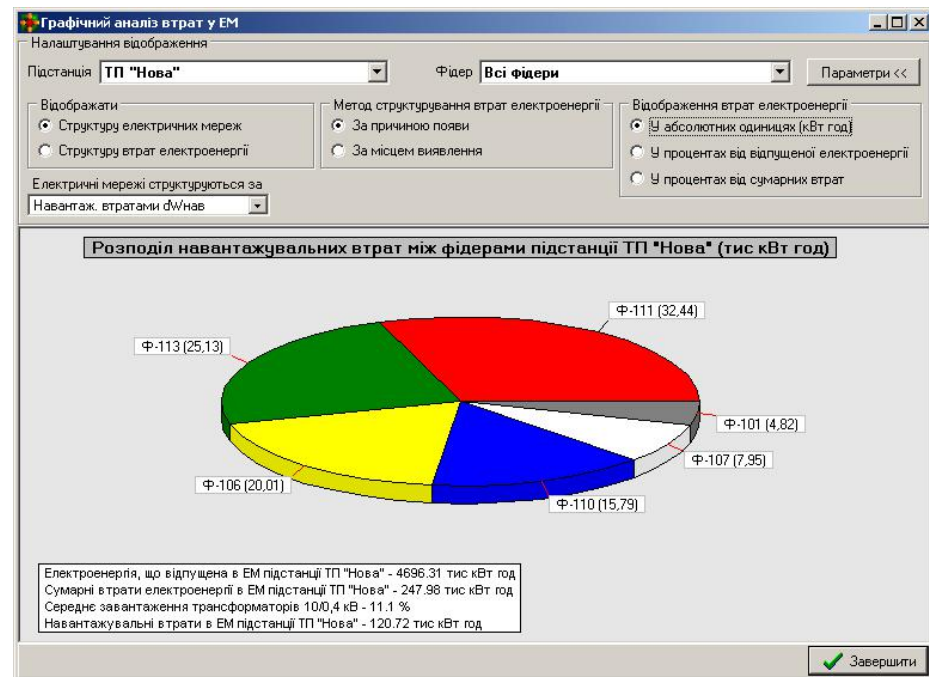


Рисунок 2 – Структурування фідерів підстанції «Нова» за навантажувальними втратами у приєднаних мережах 10 кВ

## Модуль графічного аналізу програми «ВТРАТИ» забезпечує можливість відображення:

- характеру розподілу втрат електроенергії та їх складових між живильними підстанціями розподільних мереж та окремими фідерами, що живляться від окремої підстанції;
- структури втрат електроенергії по ЕМ в цілому та окремих її фрагментах за причиною їх появи (втрат холостого ходу та навантажувальні), а також за місцем їх виявлення (втрати в лініях окремих класів номінальної напруги та трансформаторах);
- характеру розподілу окремих складових втрат електроенергії як у абсолютних, так і у відносних одиницях.

## Схема розташування КУ для забезпечення максимального ефекту зменшення втрат електроенергії в ЕМ

Підстанція	Фідер	ТП 10/0,4 кВ	Q <sub>ку</sub> , квар
ТП "Нова"	Ф-113	ТП-496	200
ТП "Нова"	Ф-111	ТП-292	70
ТП "Нова"	Ф-106	ТП-297	70
ТП "Західна"	Ф-167	ТП-260	60
ТП "Промислова"	Ф-265	ТП-234	60
ТП "Північна"	Ф-204	ТП-429	60
ТП "Південна"	Ф-30	ТП-55	60
ТП "Промислова"	Ф-253	ТП-371	60
ТП "Нова"	Ф-110	ТП-117	60
ТП "Нова"	Ф-113	ТП-205	40
ТП "Нова"	Ф-113	ТП-587	40
ТП "Нова"	Ф-111	ТП-338	40
ТП "Нова"	Ф-111	ТП-599	40
ТП "Нова"	Ф-111	ТП-606	40
ТП "Нова"	Ф-113	ТП-210	40
ТП "Західна"	Ф-167	ТП-369	40
ТП "Нова"	Ф-106	ТП-12	30
ТП "Нова"	Ф-106	ТП-225	30
ТП "Нова"	Ф-106	ТП-113	30
ТП "Нова"	Ф-106	ТП-397	30
ТП "Західна"	Ф-167	ТП-650	30
ТП "Західна"	Ф-167	ТП-630	30
ТП "Нова"	Ф-106	ТП-336	30
ТП "Нова"	Ф-106	ТП-187	30
ТП "Центральна"	Ф-13	ТП-9	30



# Формування остаточного варіанту розташування конденсаторних установок

Таблиця 1– Результати аналізу ефективності остаточної схеми розстановки КУ з урахуванням технічних обмежень та можливості встановлення

Підстанція	Фидер	$\Delta W_{\text{леп}}$ , кВт год	$\Delta W_{\text{тр}}$ , кВт год	$\Delta W_{\text{сум}}$ , кВт год	$\Delta W_{\text{сум, \%}}$	$d\Delta W_i$ , кВт год	$d\Delta W_i, \%$
Всі підстанції	Всі фидери	299897,9	638500,5	938398,4	3,05	-96705,0	-9,3
ТП "Західна"	Всі фидери	53220,0	120127,0	173347,1	2,23	-15858,8	-8,4
ТП "Західна"	Ф-156	3879,2	10095,9	13975,1	1,73	0,0	0,0
ТП "Західна"	Ф-157	533,9	1434,5	1968,4	0,56	0,0	0,0
ТП "Західна"	Ф-158	296,4	1534,2	1830,6	0,68	0,0	0,0
ТП "Західна"	Ф-165	636,2	3925,0	4561,1	1,27	0,0	0,0
ТП "Західна"	Ф-167	19802,8	9575,6	29378,4	2,07	-15796,8	-35,0
ТП "Західна"	Ф-169	0,0	1620,6	1620,6	1,30	0,0	0,0
ТП "Західна"	Ф-170	0,0	3510,8	3510,8	1,39	0,0	0,0
ТП "Західна"	Ф-177	49,1	2145,5	2194,6	2,66	0,0	0,0
ТП "Західна"	Ф-168	39,3	5655,7	5695,1	33,87	0,0	0,0
ТП "Західна"	Ф-187	4449,9	15949,8	20399,7	2,60	0,0	0,0
ТП "Західна"	Ф-155	4662,1	9876,4	14538,6	2,11	0,0	0,0
ТП "Західна"	Ф-152	558,5	8644,9	9203,4	2,46	0,0	0,0
ТП "Західна"	Ф-171	2963,1	9880,7	12843,8	1,92	0,0	0,0
ТП "Західна"	Ф-166	429,5	6311,2	6740,7	2,07	0,0	0,0
ТП "Західна"	Ф-185	4585,6	12824,0	17409,6	2,68	0,0	0,0
ТП "Західна"	Ф-150	5245,7	12865,0	18110,7	3,76	0,0	0,0
ТП "Західна"	Ф-163	275,4	9152,8	9428,1	7,59	0,0	0,0
ТП "Промислова"	Всі фидери	55862,1	127592,0	183454,1	3,10	-8477,9	-4,4
ТП "Промислова"	Ф-273	489,3	5344,0	5833,3	3,53	0,0	0,0
ТП "Промислова"	Ф-263	5619,5	13307,5	18927,0	2,71	-1055,2	-5,3
ТП "Промислова"	Ф-259	4064,0	16802,2	20866,2	3,60	-3231,8	-13,4
ТП "Промислова"	Ф-262	21845,8	30611,3	52457,0	4,23	0,0	0,0
ТП "Промислова"	Ф-253	12898,3	16255,7	29153,9	2,62	-4181,6	-12,5
ТП "Промислова"	Ф-257	507,1	6358,7	6865,8	1,68	0,0	0,0
ТП "Промислова"	Ф-265	4485,4	13248,0	17733,4	2,66	0,0	0,0
ТП "Промислова"	Ф-247	2074,1	11456,3	13530,4	3,12	0,0	0,0
ТП "Промислова"	Ф-243	3703,0	14393,5	18096,4	2,90	0,0	0,0
ТП "Східна"	Всі фидери	13098,1	34799,8	47897,9	3,51	0,0	0,0
ТП "Східна"	Ф-87	2220,4	13841,6	16062,0	3,19	0,0	0,0
ТП "Східна"	Ф-44	10877,5	20958,4	31835,9	3,69	0,0	0,0

ТП "Нова"	Ф-111	14404,4	10200,1	24604,4	2,14	-27855,1	-53,1
ТП "Нова"	Ф-110	15786,6	22999,5	38786,2	5,90	0,0	0,0
ТП "Нова"	Ф-113	10004,3	10155,7	20160,0	2,06	-26561,9	-56,9
ТП "Нова"	Ф-107	7944,1	28878,9	36823,0	7,36	0,0	0,0
ТП "Нова"	Ф-106	13383,1	13075,6	26458,7	2,90	-11429,9	-30,2
ТП "Нова"	Ф-101	4819,7	30485,5	35305,1	7,06	0,0	0,0
ТП "Центральна"	Всі фидери	32581,9	77075,9	109657,8	3,09	0,0	0,0
ТП "Центральна"	Ф-5	1321,7	10543,4	11865,0	2,08	0,0	0,0
ТП "Центральна"	Ф-11	633,8	9170,0	9803,9	1,55	0,0	0,0
ТП "Центральна"	Ф-13	2890,6	14126,3	17016,9	2,66	0,0	0,0
ТП "Центральна"	Ф-8	19093,5	16365,9	35459,4	3,71	0,0	0,0
ТП "Центральна"	Ф-7	8638,8	26873,8	35512,6	4,71	0,0	0,0
ТП "Південна"	Всі фидери	55393,1	107037,8	162430,9	2,93	-763,4	-0,5
ТП "Південна"	Ф-30	10216,5	17037,0	27253,5	3,16	0,0	0,0
ТП "Південна"	Ф-23	636,1	4833,2	5469,4	1,41	-627,1	-10,3
ТП "Південна"	Ф-305	1835,7	11694,1	13529,9	2,80	0,0	0,0
ТП "Південна"	Ф-35	291,3	2669,4	2960,7	1,82	0,0	0,0
ТП "Південна"	Ф-36(п2)	26917,0	32887,6	59804,6	3,77	0,0	0,0
ТП "Південна"	Ф-22	7664,6	17256,8	24921,4	2,60	0,0	0,0
ТП "Південна"	Ф-303	889,3	9495,2	10384,5	2,14	0,0	0,0
ТП "Південна"	Ф-36(п1)	7107,2	11136,1	18243,3	2,88	0,0	0,0
ТП "Північна"	Всі фидери	10738,1	56556,3	67294,4	4,80	-5634,8	-7,7
ТП "Північна"	Ф-206	461,2	5572,1	6033,3	2,12	0,0	0,0
ТП "Північна"	Ф-204	8653,9	36912,9	45566,8	6,86	-5629,7	-11,0
ТП "Північна"	Ф-201	1481,3	14218,1	15699,4	3,47	0,0	0,0
ТП "Технологічна"	Всі фидери	1856,2	10445,6	12301,8	2,16	0,0	0,0
ТП "Технологічна"	Ф-400	1856,2	10445,6	12301,8	2,16	0,0	0,0

## Техніко-економічне обґрунтування КРП

Таблиця 1- Перелік автоматичних конденсаторних установок, що підлягали встановленню у Вінницьких міських електричних мережах

Тип конденсаторної установки	Встановлена потужність, квар	Кількість установок, шт.	Ціна, тис.грн	Вартість, тис.грн
ВАУКРМ-200	200	1	114	114
АУКРМ-70	70	2	47,5	95
АУКРМ-60	60	6	46,5	279
АУКРМ-40	40	7	40,5	283,5
АУКРМ-30	30	9	38,5	346,5

Таблиця 2- Визначення техніко-економічних показників встановлення КРП в ВМЕМ

Параметр	Величина
Кількість встановлених КРП, шт.	25
Вартість встановлених КРП, тис.грн	1118
Експлуатаційні видатки на їх обслуговування, тис. грн	115,55
Втрати ЕЕ на рік до встановлення КРП, кВт·год	341017,7
Втрати ЕЕ на рік після встановлення КРП, кВт·год	299897,9
Зменшення втрат, кВт·год	41119,8
Надходження від зменшення втрат, тис.грн	66408,5
Термін окупності, роки	2,2
Рентабельність	0,45

## Висновки

1. Впровадження в електромережах групової компенсації реактивної потужності та розбудова засобів розосередженого генерування призводить до необхідності врахування в задачі визначення та розподілу втрат електроенергії нестабільності реактивних перетікань, використовуючи коефіцієнти форми графіків обміну потужністю для окремих вузлів ЕМ. В роботі наведено метод ідентифікації коефіцієнтів форми графіків навантажень окремих ЛЕП, який, на відміну від відомих, дозволяє визначати коефіцієнти в умовах двонаправлених перетікань реактивної потужності.

2. Проаналізувавши дані стосовно пасивних параметрів ЕМ, а також надходження та відпуску електроенергії в них, використовуючи метод аналізу чутливості втрат електроенергії до зміни реактивного споживання окремих вузлів, а також імітаційні розрахунки, що враховують можливі зміни нормальної схеми ЕМ, було намічено перелік умовно оптимальних варіантів розташування КУ на ТП 10/0,4 кВ, кожен з яких мав певні переваги з огляду на зменшення технічних втрат електроенергії та режиму напруг в ЕМ 0,4 кВ.

3. Після врахування конструктивних та технічних обмежень щодо можливості встановлення КУ на окремих ТП 10/0,4 кВ та умов їх обслуговування було сформовано остаточний варіант розташування КУ в електричних мережах. Врахування обмежень призвело до деякого (на 10-12%) зменшення ефекту від встановлення КУ, але істотного спрощення реалізації проекту та його супроводження.

4. Виходячи з отриманих результатів щодо аналізу економічної ефективності компенсації реактивної потужності у розподільних електричних мереж 10 кВ можна зробити висновок про доцільність запровадження такого заходу. Так, для оптимального варіанту реконструкції електричних мереж зниження втрат становить  $\Delta W_m = 41119,8$  кВт·год на місяць, або  $\Delta W = 400095$  кВт·год. на рік, термін окупності такого заходу становить 2.2 роки.

5. В розділі охорони праці досліджено питання технічних рішень з гігієни праці та виробничої санітарії, освітлення, шумів та інших факторів, що впливають на роботу технічного персоналу.

В підрозділі цивільного захисту при надзвичайних ситуаціях визначено найефективніші і економічно доцільні засоби захисту апаратури підстанції.

**Дякую за увагу!**