

УДК 621.311

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2023.66.021>

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЗОНАНСНИХ ЯВИЩ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ КОЛІ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА 10/0,4 КВ З КОНДЕНСАТОРНОЮ БАТАРЕЄЮ

А.О. Омельчук, канд. техн. наукНаціональний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
пр. Берестейський, 37, Київ, 03056, Україна
e-mail: omelchuk_anatoli@lil.kpi.ua

Досліджено процеси в електричній мережі з силовими трансформаторами 10/0,4 кВ із конденсаторними батареями щодо виникнення резонансу напруг і струмів як за основної частоти трифазного змінного струму 50 Гц, так і за частот 150, 250, 350 і 550 Гц, обумовлених вищими гармонічними складовими напруги й струму. Наведено графіки, що відображають резонансні процеси в конкретних колах. Бібл. 4, рис. 4, табл. 3.

Ключові слова: конденсаторна батарея, добротність, частота, резонанс напруг і струмів.

У сучасній електроенергетиці широко застосовуються пристрої компенсації реактивної складової потужності, котрі будуються на основі реактивних елементів реакторів чи конденсаторів за необхідністю та значенням компенсованої потужності, паралельно чи послідовно з'єднаними відповідним числом елементів.

Залежно від режиму електричної мережі компенсатори виконуються комбінованими та включають як індуктивний, так і ємнісний елементи, що дає змогу балансувати реактивну потужність під час її дефіциту або профіциту. Зважаючи на нестационарний режим роботи мережі, наприклад, у разі зміни реактивної потужності протягом певного часу пристрої забезпечуються тиристорним регулюванням і автоматизованими системами керування. Це дає змогу постійно підтримувати відповідний рівень реактивної потужності у вузлі мережі [1].

Однак пристрої з тиристорним регулюванням є генераторами вищих гармонік, тому потребують застосування силових фільтрів. Підвищення регулювальних можливостей та зниження впливу пристрою компенсації на показники якості електроенергії досягається подвійним перетворенням енергії. Це ускладнює схематичну частину компенсуючого пристрою, але дає змогу знизити вплив на мережу та завдяки широтно-імпульсному управлінню покращити якість регулювання, особливо за наявності споживачів із різко змінним характером навантаження [1].

З урахуванням того, що форма кривої напруги на виході силового трансформатора не-синусоїдальна й містить вищі гармонічні складові, в електричному колі можуть виникнути явища резонансу напруг для вищих гармонік, кратних основній частоті [2].

Індуктивні опори зростають, а ємнісні зменшуються пропорційно частоті, тому резонанс напруг для кратних гармонік може виникнути за потужностей конденсаторних батарей, менших в n^2 разів порівняно з потужністю конденсаторних батарей на основній частоті 50 Гц (n – кратність гармоніки відносно основної). Наприклад, для 3-ї гармоніки ($f=150$ Гц) $n^2=9$, для 5-ї гармоніки ($f=250$ Гц) $n^2=25$, для 7-ї гармоніки ($f=350$ Гц) $n^2=49$ тощо.

Резонанс напруг можна отримати, змінюючи індуктивність L , ємність C контуру або частоту $\omega=2\pi f$. За резонансної частоти, рівної $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, індуктивний і ємнісний опори рівні.

Тоді

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} = \sqrt{\frac{L}{C}} = \rho. \quad (1)$$

Добротність $Q_d = \rho/R$ характеризує резонансні властивості кола: чим більша Q_d , тим більша напруга на індуктивності U_L та ємності U_C і струм за резонансу I_d , котрі визначаються згідно з виразами

$$U_L = U_C = Q_d \cdot U, \quad (2)$$



$$I_d = Q_d \cdot U / \rho. \quad (3)$$

Як відмічено в [2], виникнення резонансу струмів на частоті 50 Гц для трансформаторів різних потужностей можливе за параметрів батарей конденсаторів від 0,02 кВ·Ар на 1 кВ·А потужності (для трансформатора 630 кВ·А) до 0,034 кВ·Ар (для трансформатора 25 кВ·А), а для виникнення резонансу напруги – відповідно від 18,7 до 26 кВ·Ар/кВ·А.

Для підвищення коефіцієнта потужності навіть на малу величину (від 0,9 до 0,95) виникає необхідність встановлення батарей конденсаторів не менше 0,14 кВ·Ар/кВ·А, а для збільшення коефіцієнта потужності від 0,7 до 0,95 – всього 0,66 кВ·Ар/кВ·А.

Дослідження явища резонансу струмів і напруги в разі вмикання конденсаторних батарей на стороні вторинної напруги 0,4 кВ силового трансформатора споживчої трансформаторної підстанції напругою 10/0,4 кВ, викладені в [2], на частотах вищих гармонік, кратних основній частоті, дали такі результати.

На частоті 150 Гц (третя гармоніка) резонанс напруг також практично неможливий із названих в [2] причин: потужність батареї конденсаторів у цьому випадку повинна перевищувати потужність трансформатора в 2,5...3 рази.

На частоті 250 Гц для виникнення резонансу напруги стає необхідним встановлення батареї конденсаторів потужністю, приблизно рівною потужності трансформатора, що мало-ймовірно в практичних умовах.

Найбільш імовірним є виникнення резонансу напруги на частоті 350 Гц і вище. Так, за частоти 350 Гц резонанс напруг виникає в разі встановлення батареї напругою 0,38 кВ·Ар/кВ·А (для трансформатора 630 кВ·А), а для трансформатора 25 кВ·А – 0,54 кВ·Ар/кВ·А. Резонансні явища проявляються зазвичай для більш потужних трансформаторів, добротність котрих вища.

Наведемо приклад розрахунку резонансних частот і резонансних кривих $U_c = \varphi(f)$ для трансформатора з номінальною потужністю 40 кВ·А у разі встановлення на шинах 0,38 кВ конденсаторної батареї потужністю $Q_c = 20$ кВ·Ар та ємністю $C = 440$ мкФ.

У режимі автоматичного регулювання потужності конденсаторної батареї розглядаються два випадки (включено 100 % потужності – дві батареї і включено 50 % потужності – одна конденсаторна батарея), кожному з яких буде відповідати своя резонансна частота й матиме місце різне підвищення напруги на конденсаторах за інших частот.

На рис. 1 наведено резонансні криві напруги для трансформатора потужністю 40 кВ·А у разі підключених конденсаторних батарей, де суцільна лінія – $Q_c = 40$ кВ·Ар, пунктирна лінія – $Q_c = 20$ кВ·Ар.

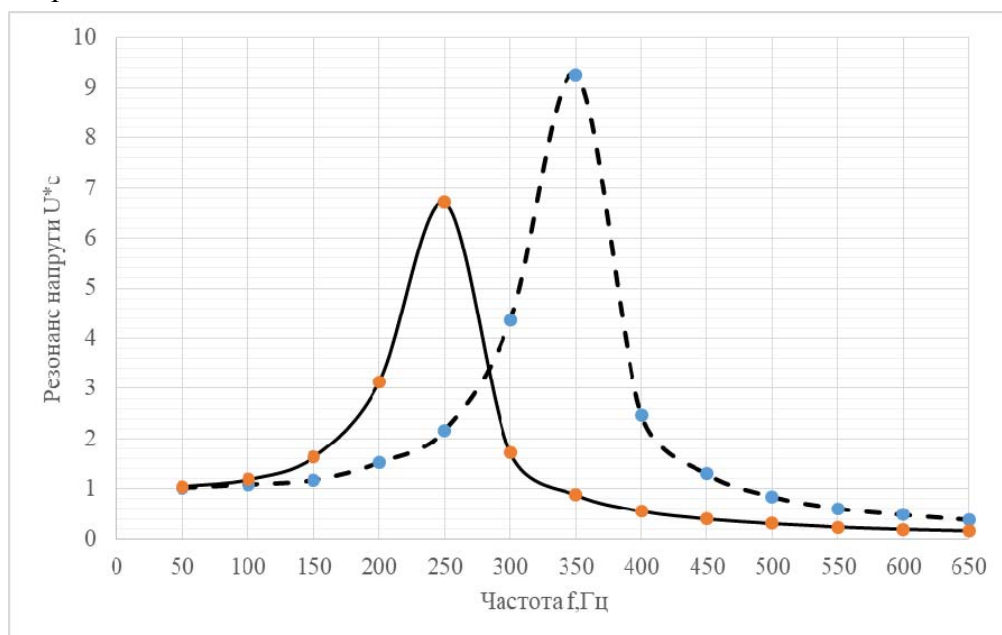


Рис. 1

1. Включені дві конденсаторні батареї (100 % потужності) загальною ємністю $C=2 \cdot C_1=880$ мкФ. Кутова частота

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{0,510^{-3} \cdot 880 \cdot 10^{-6}}} = 1505,67 \frac{\text{рад}}{\text{с}},$$

де L – індуктивність силового трансформатора, Гн; C – ємність включеної конденсаторної батареї, мкФ.

Це відповідає частоті $f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1505,67}{6,28} = 239,75$ Гц. Визначимо добротність $Q_{d.\text{макс}}$

для резонансної частоти $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{500}{880}} = 0,754$; $Q_{d.\text{макс}} = \frac{\rho}{R_{\text{к.мін}}} = \frac{0,754}{0,088} = 8,5549$.

2. Включена одна конденсаторна батарея (50 % потужності) ємністю $C=C_1=440$ мкФ.

Кутова частота $\omega_0 = \frac{10^5}{5440} = 2129,34 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$; $f_0 = \frac{2129,34}{6,28} = 339,49$ Гц.

$$\rho = \sqrt{\frac{500}{440}} = 1,066; \quad Q_{d.\text{макс}} = \frac{1,066}{0,088} = 12,09.$$

Визначивши значення $K=\omega/\omega_0$ для основної та кратних гармонік, розраховуємо відносне підвищення напруги на конденсаторах батареї за різних частот:

$$U_c = \frac{A}{\sqrt{1+Q^2\left(K-\frac{1}{K}\right)^2}}, \quad (4)$$

де $A=Q/K$.

Аналогічно виконано розрахунки для силових трансформаторів інших потужностей: на рис. 2 наведено резонансні криві напруги для трансформатора потужністю 250 кВ·А за підключеної потужності конденсаторної батареї, де суцільна лінія – $Q_c=200$ кВ·Ар, пунктирна – $Q_c=160$ кВ·Ар, штрих-пунктирна $Q_c=120$ кВ·Ар.

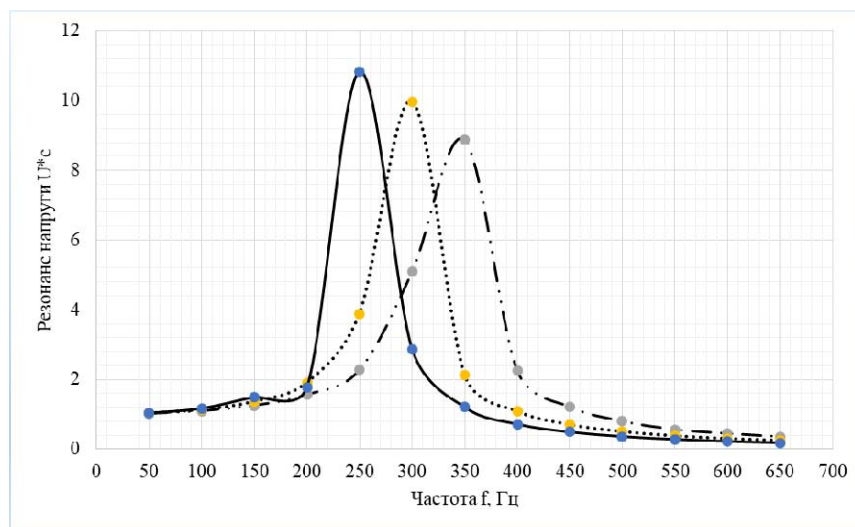


Рис. 2

На рис. 3 наведено резонансні криві напруги для трансформатора потужністю 400 кВ·А за підключених конденсаторних батарей, де позначено: суцільна лінія – $Q_c=240$ кВ·Ар, пунктирна – $Q_c=200$ кВ·Ар, штрих-пунктирна – $Q_c=160$ кВ·Ар.

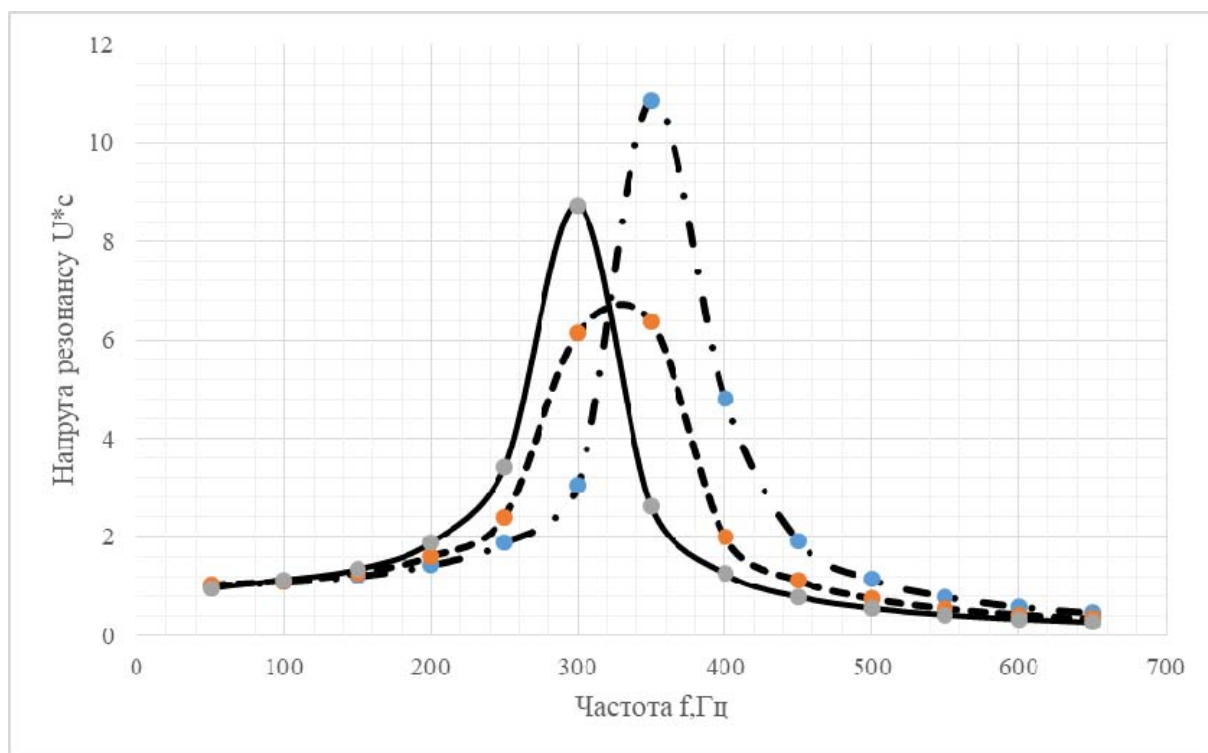


Рис. 3

На рис. 4 наведено резонансні криві напруги для трансформатора потужністю 630 кВ·А за підключених конденсаторних батарей потужністю: суцільна лінія – $Q_c=400$ кВ·Ар, пунктирна – $Q_c=320$ кВ·Ар, штрих-пунктирна – $Q_c=240$ кВ·Ар.

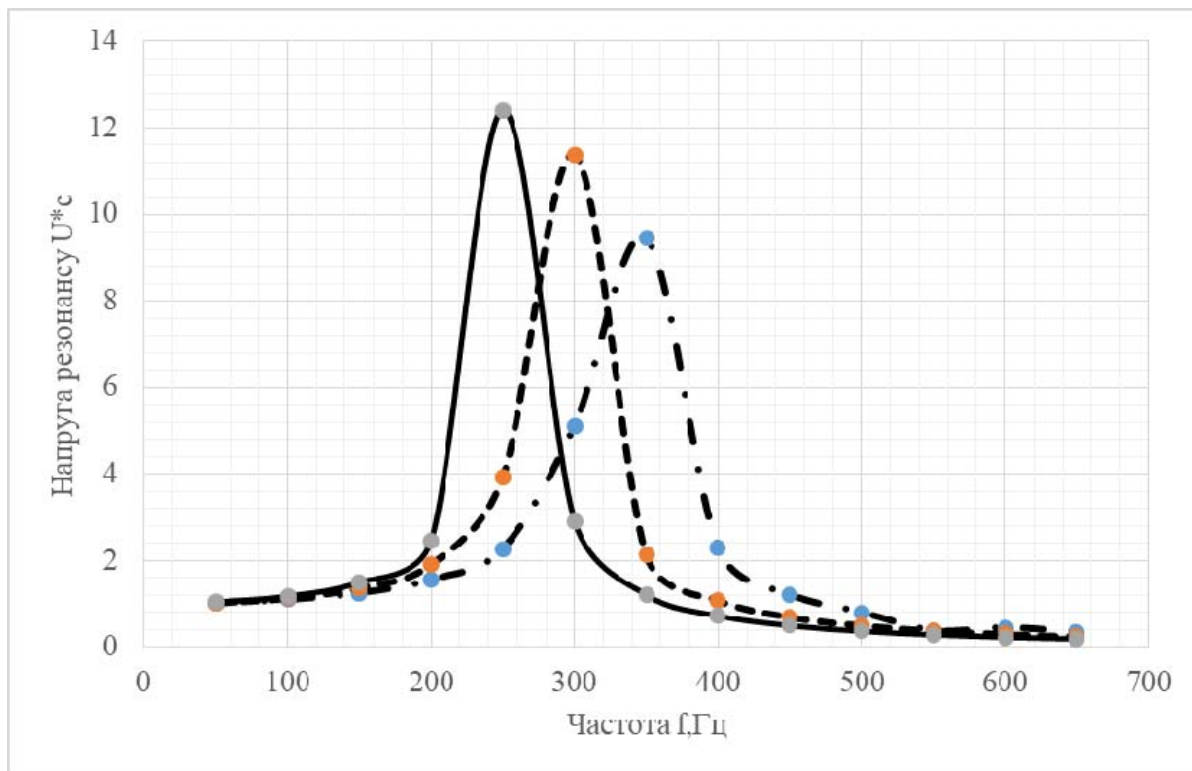


Рис. 4

Потужність батарей конденсаторів має відхилення від номінальних паспортних даних, і практичний інтерес становить відхилення резонансної частоти від розрахункової, котре можна визначити згідно з виразом:

$$\Delta f\% = \frac{1 - \sqrt{1 \pm \frac{\Delta C\%}{100}}}{\sqrt{1 \pm \frac{\Delta C\%}{100}}}, \quad (5)$$

де $\Delta f\%$ – відхилення резонансної частоти від розрахункової, %; $\Delta C\%$ – відхилення ємності батарей конденсаторів від номінальної, %.

У табл. 1 наведено розрахунок залежності параметрів резонансу напруги від частоти $U_c^*(f)$ для трансформатора 40 кВ·А.

Таблиця 1

а) конденсаторна батарея $Q_c=20$ кВ·Ар; $w_0=2129,34$ рад/с; $Q_{d, \max}=12,09$; $Q_{d, \max}^2=146,38$													
Частота, Гц	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650
$w=2\pi \cdot f$	314	628	942	1256	1570	1884	2198	2512	2826	3140	3454	3768	4082
$K=w/w_0$	0,14	0,29	0,44	0,58	0,73	0,88	1,03	1,17	1,32	1,47	1,62	1,76	1,91
$A=Q/K$	81,9	40,9	27,3	20,4	16,4	13,6	11,7	10,2	9,10	8,19	7,45	6,91	6,37
$U_c = A / \sqrt{1 + Q^2 \left(K - \frac{1}{K} \right)^2}$	1,02	1,09	1,17	1,52	2,17	4,36	9,25	2,47	1,29	0,84	0,61	0,48	0,38
б) конденсаторна батарея $Q_c=40$ кВ·Ар; $w_0=1505,67$ рад/с; $Q_{d, \max}=8,5549$; $Q_{d, \max}^2=73,1876$													
$K=w/w_0$	0,20	0,41	0,62	0,83	1,04	1,25	1,45	1,66	1,87	2,08	2,29	2,50	2,71
$A=Q/K$	41,0	20,5	13,6	10,2	8,20	6,83	5,89	5,07	4,55	4,10	3,72	3,41	3,15
$U_c = A / \sqrt{1 + Q^2 \left(K - \frac{1}{K} \right)^2}$	1,04	1,18	1,63	3,13	6,70	1,71	0,88	0,55	0,39	0,30	0,23	0,18	0,15

У табл. 2 наведено вплив відхилення ємності на відхилення резонансної частоти $\Delta f\%$ від розрахункової за різних величин відхилення ємності від номінальної $\Delta C\%$.

Таблиця 2

$\Delta C\%$	+20	+15	+10	+5	0	-5	-10	-15	-20
$\Delta f\%$	-8,7	-6,74	-4,65	-2,4	0	+2,6	+5,4	+8,46	+11,8

Як приклад в табл. 3 наведено вплив відхилення ємності батарей конденсаторів різної потужності на резонансну частоту для трансформатора 400 кВ·А за різних величин потужності включених конденсаторних батарей.

Таблиця 3

Потужність конденсаторної батареї Q_c	Резонансна частота в разі відхилення								
	+20	+15	+10	+5	0	-5	-10	-15	-20
$0,6 \cdot S_n$	272	278	285	291	298,2	306	314	324	333
$0,5 \cdot S_n$	298	305	312	319	326,7	335	344	354	365
$0,4 \cdot S_n$	331	341	348	356	365,2	374	385	396	408
$0,3 \cdot S_n$	385	393	402	412	421,7	433	445	458	471,5
$0,2 \cdot S_n$	472	482	493	504	516,5	530	544	560	577
$0,1 \cdot S_n$	667	681,5	697	713	730,5	749,5	770	792,6	816,7

Висновок. Отримані результати свідчать про те, що для виникнення резонансу струмів на основній частоті для силових трансформаторів різних потужностей потужність батарей конденсаторів повинна складати від 0,02 кВ·Ар на 1 кВ·А потужності (для трансформатора 630 кВ·А) до 0,034 кВ·Ар (для трансформатора 25 кВ·А), а для виникнення резонансу напруги – відповідно від 18,7 до 26 кВ·Ар/кВ·А.

Окрім того, розрахунки показують, що для підвищення коефіцієнта потужності навіть

на малу величину (від 0,9 до 0,95) необхідно встановлювати батареї конденсаторів не менше 0,14 кВ·Ар/кВ·А, а для збільшення коефіцієнта потужності – від 0,7 до 0,95 – всього 0,66 кВ·Ар/кВ·А.

1. Давидов О.Ю., Бялобржеський О.В. Аналіз засобів компенсації реактивної потужності в електротехнічних системах. *Вісник КДУ імені Михайла Остроградського*. 2010. Вип. 3 (62). Ч.1. С. 132–136.
2. Омельчук А.О., Дерев'янко Д.Г., Ткаченко В.В. Дослідження резонансних явищ при вмиканні в мережу 0,38 кВ батарей конденсаторів поперечної компенсації. *Енергетика і автоматика*. 2023. № 1. С. 42–53.
3. Омельчук А.О. Енергозберігаючі режими в системах електропостачання: Навч. Посібник. К.: ЦП «КОМПРИНТ», 2016. 257 с.
4. Правила улаштування електроустановок. Х.: Форт, 2017. 760 с.

STUDY OF RESONANCE PHENOMENA IN THE ELECTRICAL CIRCUIT OF A 10/0.4 KV POWER TRANSFORMER WITH A CAPACITOR BATTERY

A.O. Omel'chuk

National Technical University of Ukraine Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute,

Beresteyskyi ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine

e-mail: omelchuk_anatoli@iill.kpi.ua

The processes in the electrical network with power transformers 10/0.4 kV with capacitor banks were investigated for the occurrence of resonance of voltages and currents at the main frequency of three-phase alternating current 50 Hz, as well as at frequencies of 150, 250, 350 and 550 Hz, caused by higher harmonic components voltage and current. Graphs showing resonance processes in specific circles are given. Bible 4, fig. 4, tabl. 3.

Keywords: capacitor battery, Q factor, frequency, resonance of voltages and currents.

1. Davydov O.Yu., Byalobrzhes'kyi O.V. Analysis of means of reactive power compensation in electrical engineering systems. *Visnyk KDU im. Mykhayla Ostrohrads'koho*. 2010. Issue 3 (62). P. 1. Pp. 132–136. (Ukr)
2. Omel'chuk A. O., Derev'yanko D.H., Tkachenko V.V. Study of resonance phenomena when connecting 0.38 kV batteries of transverse compensation capacitors to the network. *Enerhetyka i avtomatyka*. 2023. No 1. Pp. 42–53. (Ukr)
3. Omel'chuk A.O. Energy-saving modes in power supply systems: Kyiv: TSP KOMPRYNT, 2016. 257 p. (Ukr)
4. Rules for arranging electrical installations. Kharkiv: Fort, 2017. 760 p. (Ukr)

Надійшла: 13.06.2023

Прийнята: 22.06.2023

Submitted: 13.06.2023

Accepted: 22.06.2023