

УДК 53.088.24

С. Ю. ШЕВЧЕНКО, В. В. ВОЛОХІН, С. М. ЛЕБЕДКА, І. М. ДЯГОВЧЕНКО, М. В. КАЧАН

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВІДХИЛЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ НАПРУГИ ТА ЧАСТОТИ НА ПОКАЗИ ПРИБАДІВ ОБЛІКУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Електричну напругу та частоту розглянуто як величини, які носять випадковий характер і підкорюються Гаусівському закону розподілу. За допомогою статистичних методів аналізу даних розглянуто, як впливає відхилення напруги і частоти в межах, що нормуються ГОСТ 13109-97, та поза цими межами на покази приладів обліку електричної енергії. Зроблено висновки щодо доцільності регулювання частоти та напруги в електричних мережах.

Ключові слова: напруга, частота, прилад обліку, лічильник, електрична енергія, мережа, опір, індуктивність, ємність, математичне сподівання, дисперсія, середньоквадратичне відхилення.

Вступ. Залежно від виду використовуваного устаткування, навантаження підрозділяється на активне, індуктивне і ємнісне. Найбільш часто електроспоживачі мають змішане активно-індуктивне навантаження. Відповідно, з електричної мережі відбувається споживання як активної, так і реактивної енергії.

Для вимірювання електричної енергії в системах електропостачання в даний час застосовуються як індукційні, так і електронні лічильники електроенергії.

При цьому покази індукційних лічильників активної і реактивної енергії практично не залежать від наявності вищих гармонік і постійної складової струму і/або напруги. Обертаючий момент, що діє на ротор, який знаходиться в обертовому магнітному полі, чи сила, що впливає на якір (диск), що знаходиться в рухомому магнітному полі, пропорційні діючому значенню перших гармонік напруги та/або струму, які створюють це поле [5].

Вплив інших гармонік або відсутній (наприклад, 3-я та 9-а гармоніки), або дуже малий [5]. Звідси впливає, що покази активного індукційного лічильника пропорційні активній потужності перших гармонік струму і напруги навантаження:

$$P = U_{(1)} \cdot I_{(1)} \cdot \cos \varphi_{(1)} = P_{(1)} \cdot t, \quad (1)$$

де $U_{(1)}$ – діюче значення першої гармоніки напруги; $I_{(1)}$ – діюче значення першої гармоніки струму; $\cos \varphi_{(1)}$ – коефіцієнт потужності першої гармоніки; $P_{(1)}$ – активна потужність першої гармоніки; t – поточний час.

Однофазні реактивні лічильники, що працюють за індуктивним принципом, реалізуються за допомогою схеми 90-градусного зсуву. Реактивні прилади обліку електроенергії для трифазних мереж реалізуються шляхом включення кіл напруги на різні фази [7]. Звідси впливає, що покази індукційного лічильника електроенергії пропорційні реактивній потужності першої гармоніки напруги та першої гармоніки струму:

$$Q = U_{(1)} \cdot I_{(1)} \cdot \sin \varphi_{(1)} = Q_{(1)} \cdot t, \quad (2)$$

де $Q_{(1)}$ – реактивна потужність першої гармоніки.

У формулі (1) коефіцієнт потужності може бути визначений як:

$$\cos \varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}, \quad (3)$$

де R – активний опір електричного кола, Ом; X_L – реактивний індуктивний опір кола, Ом; X_C – реактивний ємнісний опір кола.

Величина $\sin \varphi$ може бути визначена як:

$$\sin \varphi = \frac{(X_L - X_C)}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}. \quad (4)$$

Реактивний індуктивний та реактивний ємнісний опір залежать від величин індуктивності L та ємності C відповідно та від частоти в електричній мережі f . Від перелічених параметрів, в свою чергу, напругу залежать значення $\cos \varphi$ та $\sin \varphi$. Запишемо для них аналітичні вирази (5) та (6).

$$X_L = \omega L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L; \quad (5)$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}. \quad (6)$$

Звідси можемо зробити висновок, що на значення активної та реактивної потужності, які будуть виміряні відповідними приладами обліку, мають вплив три змінні параметри:

- напруга,
- струм,
- частота.

Аналіз існуючих відхилень напруги і частоти.

Відхилення напруги – відмінність фактичної напруги в сталому режимі роботи системи електропостачання від її номінального значення [1].

Відхилення напруги визначається різницею між її дійсним U і номінальним значеннями $U_{ном}$, В [2, 3]:

$$\delta U = U - U_{ном}. \quad (7)$$

Відхилення напруги в тій чи іншій точці мережі відбувається під впливом зміни навантаження у відповідності з її графіком.

В електричних мережах однофазного струму діюче значення напруги визначається як значення напруги основної частоти $U_{(1)}$ без урахування вищих гармонійних складових напруги, а в електромережах трифазного струму – як діюче значення напруги прямої послідовності основної частоти $U_{1(1)}$ [4].

Нормально і гранично допустимі значення усталеного відхилення напруги на затискачах електроприймачів нормуються ГОСТ 13109-97 і дорівнюють, відповідно, $\delta U_{нор} = \pm 5\%$ і $\delta U_{гран} = \pm 10\%$.

Відхилення частоти напруги змінного струму, як встановлено у ГОСТ 13109 – 97, в електричних мережах характеризується показником відхилення частоти δf . Відхилення частоти від номінальної дорівнює різниці фактичного і номінального значення частоти.

У нормальних режимах допустимі значення відхилення частоти дорівнюють $\pm 0,2$ Гц і максимально допустимі $\pm 0,4$ Гц.

В післяаварійних режимах роботи електричної мережі допускається відхилення частоти від $\pm 0,5$ до -1 Гц загальною тривалістю за часом не більше 90 годин [5].

У відповідності до даних спостережень служби підстанції ПАТ «Сумиобленерго», які проводилися на КТП-134 на фідері № 34, від якого відбувається живлення побутових споживачів (одноповерхові житлові будинки) с. Яструбине, отримали результати вимірювання напруги (табл. 1) та частоти (табл. 2). Результати

наведені для фази А.

Вимірювання проводилися за допомогою аналізатора-регістратора якості електроенергії з функцією вимірювання флікера REN-700 біля пункту живлення (КТП-134), на середині та в кінцевій точці фідера (останній будинок на лінії). Всього було виконано 2064 виміри для величини напруги та 972 виміри для частоти. Періодичність проведення вимірювань була виставлена такою, що дорівнювала інтервалу 30 хвилин.

За даними експериментів табл. 1 побудуємо залежність $p(U)$ рис. 1.

За даними експериментів табл. 2 побудуємо залежність $p(f)$ рис. 2.

Таблиця 1 – Результати спостережень випадкової величини напруги

№ з/п	Відсоткове відхилення, $\pm \%$	Відхилення у бік перевищення $U_{ном}$			Відхилення у бік, менший $U_{ном}$		
		Кількість результатів, n	$U/U_{ном}$	Випадкове значення U , В	Кількість результатів, n	$U/U_{ном}$	Випадкове значення U , В
1	0	81	1	220	81	1	220
2	0,5	81	1,005	221,1	80,5	0,995	218,9
3	1	80	1,01	222,2	79,5	0,99	217,8
4	1,5	79	1,015	223,3	78	0,985	216,7
5	2	77	1,02	224,4	77	0,98	215,6
6	2,5	76	1,025	225,5	76	0,975	214,5
7	3	75	1,03	226,6	75	0,97	213,4
8	3,5	72	1,035	227,7	72	0,965	212,3
9	4	70	1,04	228,8	70	0,96	211,2
10	4,5	67	1,045	229,9	66	0,955	210,1
11	5	59	1,05	231	59	0,95	209
12	5,5	46	1,055	232,1	47	0,945	207,9
13	6	36	1,06	233,2	38	0,94	206,8
14	6,5	31	1,065	234,3	32	0,935	205,7
15	7	24	1,07	235,4	25	0,93	204,6
16	7,5	19	1,075	236,5	19	0,925	203,5
17	8	12,5	1,08	237,6	12	0,92	202,4
18	8,5	9	1,085	238,7	8	0,915	201,3
19	9	6	1,09	239,8	6	0,91	200,2
20	9,5	5	1,095	240,9	5	0,905	199,1
21	10	5	1,1	242	5	0,9	198
22	10,5	4	1,105	243,1	4	0,895	196,9
23	11	3,5	1,11	244,2	3	0,89	195,8
24	11,5	3	1,115	245,3	3	0,885	194,7
25	12	3	1,12	246,4	3	0,88	193,6
26	12,5	3	1,125	247,5	3	0,875	192,5
27	13	1	1,13	248,6	1	0,87	191,4
28	13,5	1	1,135	249,7	1	0,865	190,3
29	14	1	1,14	250,8	1	0,86	189,2
30	14,5	1	1,145	251,9	1	0,855	188,1
31	15	1	1,15	253	1	0,85	187

На рис. 1 $p(U)$ – залежність, котра відображає вірогідність того, що при кількості експериментальних вимірювань n величина напруги дорівнюватиме значенню U ; $f(U)$ – теоретична крива нормального (Гаусівського) розподілу. Аналогічні міркування справедливі і для рис. 2, з тією різницею, що за змінну величину виступає частота f .

Порівнявши емпірично та теоретично отримані залежності за критерієм Пірсона, дійшли висновку, що згода між емпіричним і теоретичним нормальним розподілом є статистично значущою. Іншими словами, теоретично нормальний розподіл задовільно описує емпіричні дані.

Спираючись на вище викладене, вважаємо, що залежності $p(U)$ та $p(f)$ підкорюються нормальному (Гаусівському) закону розподілу. Тобто, маємо розподіл вірогідностей, які в одновірному випадку можуть бути задані функцією щільності вірогідності, що спадає з функцією Гауса [8, 11]:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-m_x)^2}{2\sigma_x^2}}, \quad (8)$$

де m_x – параметр математичного сподівання; σ_x – середньоквадратичне відхилення; x_i – випадкове значення досліджуваної величини.

Таблиця 2 – Результати спостережень випадкової величини частоти

№ з/п	Відсоткове відхилення, $\pm \%$	Відхилення у бік перевищення $f_{ном}$			Відхилення у бік, менший $f_{ном}$		
		Кількість результатів, n	$ff_{ном}$	Випадкове значення f , Гц	Кількість результатів, n	$ff_{ном}$	Випадкове значення f , Гц
1	0	35	1	50	35	1	50
2	0,04	35	1,0004	50,02	34	0,9996	49,98
3	0,08	34	1,0008	50,04	34	0,9992	49,96
4	0,12	34	1,0012	50,06	34	0,9988	49,94
5	0,16	33	1,0016	50,08	33	0,9984	49,92
6	0,2	33	1,002	50,1	33	0,998	49,9
7	0,24	32	1,0024	50,12	33	0,9976	49,88
8	0,28	32	1,0028	50,14	32	0,9972	49,86
9	0,32	31	1,0032	50,16	31	0,9968	49,84
10	0,36	30	1,0036	50,18	30	0,9964	49,82
11	0,4	28	1,004	50,2	27	0,996	49,8
12	0,44	26	1,0044	50,22	26	0,9956	49,78
13	0,48	23	1,0048	50,24	22	0,9952	49,76
14	0,52	19	1,0052	50,26	19	0,9948	49,74
15	0,56	15	1,0056	50,28	15	0,9944	49,72
16	0,6	11	1,006	50,3	12	0,994	49,7
17	0,64	8	1,0064	50,32	9	0,9936	49,68
18	0,68	5	1,0068	50,34	5	0,9932	49,66
19	0,72	5	1,0072	50,36	4	0,9928	49,64
20	0,76	3	1,0076	50,38	3	0,9924	49,62
21	0,8	3	1,008	50,4	3	0,992	49,6
22	0,84	2	1,0084	50,42	3	0,9916	49,58
23	0,88	2	1,0088	50,44	2	0,9912	49,56
24	0,92	2	1,0092	50,46	2	0,9908	49,54
25	0,96	1	1,0096	50,48	1	0,9904	49,52
26	1	1	1,01	50,5	1	0,99	49,5
27	1,04	1	1,0104	50,52	1	0,9896	49,48
28	1,08	0,5	1,0108	50,54	0,5	0,9892	49,46
29	1,12	0,5	1,0112	50,56	0,5	0,9888	49,44
30	1,16	0,5	1,0116	50,58	0,5	0,9884	49,42
31	1,2	0,5	1,012	50,6	0,5	0,988	49,4

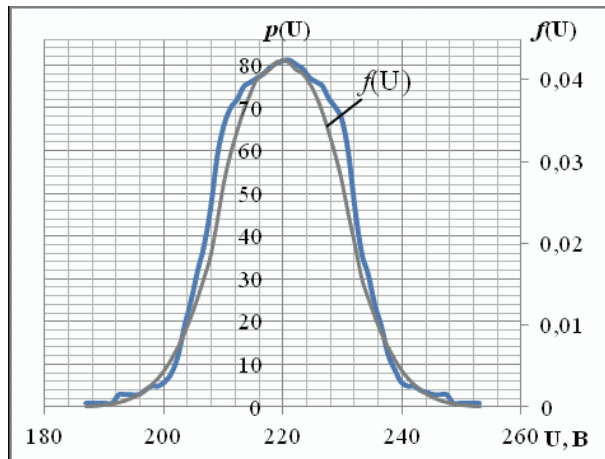


Рисунок 1 – Нормальний закон розподілу для величини напруги

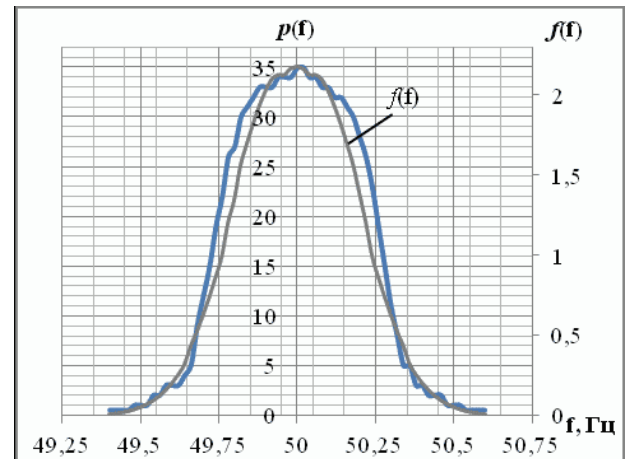


Рисунок 2 – Нормальний закон розподілу для величини частоти

Далі приймемо, що таке ж розподілення напруги та частоти має місце у звичайній однофазній електричній мережі і з'ясуємо, який вплив матимуть відхилення напруги та частоти від номінальних значень (220 В та 50 Гц) на покази індуктивних лічильників активної та реактивної енергії. Під «звичайною» тут розуміємо електричну мережу, приведену до вигляду еквівалентного електричного кола, в якому є навантаження активного, індуктивного та ємнісного характе-

ру (рис. 3).

У якості приймачів електричного кола візьмемо трифазний асинхронний двигун (АД) з короткозамкненим ротором 5AMX132S6 та конденсатор Last One ємністю 1000 мкФ, розрахований на номінальну напругу 330 В [6].

Шість полюсів статора АД 5AMX132S6 з'єднуємо послідовно. Їхній активний загальний опір дорівнює 21,0027 Ом, а реактивний індуктивний –

17,4032 Ом (визначено шляхом перерахунку коефіцієнта потужності електричного кола рис. 3, виміряного за допомогою вимірювальних кліщів, та загального опору, визначеного мультиметром).

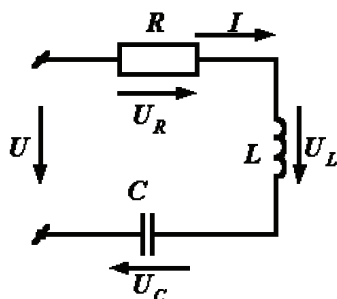


Рисунок 3 – Послідовне електричне коло змінного струму

Отже маємо коло з такими параметрами:

- номінальна напруга: $U = 220$ В;
- активний опір: $R = 21,0027$ Ом;
- індуктивність: $L = 0,05542$ Гн;
- ємність: $C = 0,001$ Ф.

Так як величини напруги та частоти підкорюються Гаусівському закону розподілу, то можемо обробити отримані результати експериментів, використовуючи такі числові характеристики випадкових величин та їхніх систем:

1. Математичне сподівання (середня ймовірність значення випадкової величини):

$$M[x] = m_x = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx. \quad (9)$$

Математична оцінка сподівання:

$$M^*[X] = m_x^* = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (10)$$

де n – кількість експериментів.

2. Дисперсія випадкової величини (міра розкиду даної випадкової величини, тобто її відхилення від математичного очікування):

$$D[x] = D_x = \int_{-\infty}^{\infty} (x - m_x)^2 f(x) dx, \quad (11)$$

Математична оцінка дисперсії:

$$D^*[X] = D_x^* = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - m_x^*)^2. \quad (12)$$

$$D^*[X] = D_x^* = \frac{1}{n-1} \left[\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}{n} \right]. \quad (13)$$

3. Середньоквадратичне відхилення (показник розсіювання значень випадкової величини відносно її математичного очікування):

$$\sigma_x = \sqrt{D_x}. \quad (14)$$

Математична оцінка середньоквадратичного відхилення:

$$\sigma_x^* = \sqrt{D_x^*}. \quad (15)$$

Напруга і частота в електричній мережі носять випадковий характер. За даними експериментів (табл. 1 та 2) можемо визначити для них математичне сподівання, користуючись формулами (9) та (10). Отримаємо:

$m_U = 219,98$ В, $m_f = 49,9998$ Гц.

Для визначення показів індуктивних лічильників активної та реактивної енергії при різних коливаннях напруги та частоти в електричній мережі (рис. 3), реалізуємо програмний код, написаний мовою С у середовищі Borland C++ 3.1. Ця програма буде відтворювати алгоритм роботи лічильників активної та реактивної енергії, що описаний у формулах (1) і (2).

Послідовність моделювання відхилення напруги від номінального значення в середовищі Borland C++ 3.1.

1. Розглядаємо випадки, коли величина напруги може мати відхилення від номінального значення в таких межах: $\pm 2,5\%$; $\pm 5\%$; $\pm 7,5\%$; $\pm 10\%$; $\pm 12,5\%$; та $\pm 15\%$. При цьому частоту вважаємо незмінною та такою, що дорівнює 49,9998 Гц.

2. Використовуючи формули (11) – (15), визначимо значення дисперсії та середньоквадратичного відхилення для напруги.

3. Математичне сподівання, дисперсія, середньоквадратичне відхилення напруги та параметри електричної мережі заносяться до програми.

4. Для частоти приймаємо математичне сподівання $m_f = 49,9998$ Гц та середньоквадратичне відхилення $\sigma_f = 0$. Заносимо ці данні до програми.

5. Опір елементів електричної мережі (рис. 3) вважаємо таким, що не залежить від напруги і залежить від частоти (відповідно до формул (5) та (6) для реактивної складової опору). Діюче значення струму може бути визначене за законом Ома наступним чином:

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}. \quad (16)$$

6. Кількість розрахункових ітерацій пошуку випадкової величини: $1 \cdot 10^6$. Отримані результати представимо їх у табл. 3.

В табл. 3 використано наступні позначення:

$U_{ном}$, % – відхилення напруги від номінального значення, %;

D_U – дисперсія напруги, В²;

σ_U – середньоквадратичне відхилення величини напруги, В;

m_P – математичне сподівання активної потужності, Вт;

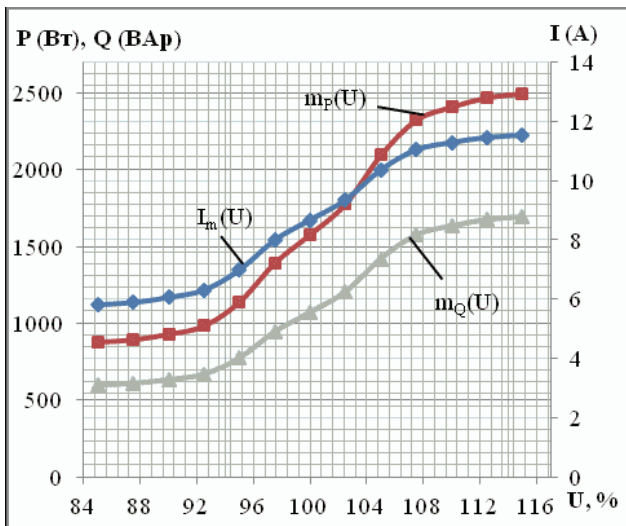
σ_P – середньоквадратичне відхилення активної потужності, Вт;

m_Q – математичне сподівання реактивної потужності, ВАр;

σ_Q – середньоквадратичне відхилення реактивної потужності, ВАр.

За табл. 3 побудуємо відповідні графіки залежностей на рис. 4.

Побудовані графіки залежностей наочно демонструють, що відхилення напруги має значний вплив на значення активної та реактивної потужності та струму. Зростання величини напруги в електричній мережі призводить до збільшення активної та реактивної потужності та струму, а зменшення напруги – до зменшення названих величин.

Рисунок 4 – Графіки залежностей $m_P(U)$, $m_Q(U)$, $I_m(U)$

Відповідно до формул (1) і (2), за умови $t = \text{const}$, це матиме вплив на покази лічильників активної та реактивної енергії.

Послідовність програмного моделювання відхилення частоти від номінального значення в Borland C++ 3.1.

1. Розглядаємо випадки, коли величина частоти може мати відхилення від номінального значення в таких межах: $\pm 0,2 \%$; $\pm 0,4 \%$; $\pm 0,6 \%$; $\pm 0,8 \%$; $\pm 1 \%$; та $\pm 1,2 \%$. При цьому напругу вважаємо незмінною та такою, що дорівнює 219,98 В

2. За допомогою формул (11) – (15), визначаються значення дисперсії та середньоквадратичного відхилення для частоти.

3. Математичне сподівання, дисперсія, середньоквадратичне відхилення частоти та параметри електричної мережі заносяться до програми.

4. Для напруги приймаємо математичне сподівання $m_U = 219,98$ Гц та середньоквадратичне відхилення $\sigma_U = 0$. Заносимо ці данні до програми.

5. Все інше – як і для випадку з напругою. Кількість розрахункових ітерацій для пошуку випадкової величини: $1 \cdot 10^6$. Отримані результати показані у табл. 4.

В табл. 4 використано наступні позначення:

$f_{\text{ном}}, \%$ – відхилення напруги від номінального значення, %;

D_f – дисперсія напруги, Гц²;

σ_f – середньоквадратичне відхилення величини частоти, Гц;

m_P – математичне сподівання активної потужності, Вт;

Таблиця 3 – Результати програмного моделювання при відхиленні напруги

Результати розрахунків			Результати програмного моделювання									
$U_{\text{ном}}, \%$	$D_U, \text{В}^2$	$\sigma_U, \text{В}$	$\cos\phi$	$\sin\phi$	$I, \text{А}$	$X_L, \text{Ом}$	$X_C, \text{Ом}$	$m_P, \text{Вт}$	$\sigma_P, \text{Вт}$	$m_Q, \text{ВАр}$	$\sigma_Q, \text{ВАр}$	
85	88,43176	9,4038	0,827919	0,560847	5,81233	17,4107	3,1831	879,413	141,853	595,73	96,094	
87,5	83,82168	9,1554	0,827919	0,560847	5,88788	17,4107	3,1831	895,092	139,344	606,352	95,3944	
90	73,81909	8,5918	0,827919	0,560847	6,05928	17,4107	3,1831	931,235	133,404	630,835	90,3704	
92,5	60,51496	7,7791	0,827919	0,560847	6,30645	17,4107	3,1831	984,736	124,233	667,078	84,1578	
95	30,7723	5,5473	0,827919	0,560847	6,98521	17,4107	3,1831	1140,07	95,3574	772,305	64,5968	
97,5	4,971675	2,2297	0,827919	0,560847	7,9942	17,4107	3,1831	1393,77	42,3842	944,168	28,7118	
100	0	0,0000	0,827919	0,560847	8,67232	17,4107	3,1831	1579,6	0,000688	1070,05	0,000594	
102,5	4,971675	2,2297	0,827919	0,560847	9,35045	17,4107	3,1831	1777,73	47,8545	1204,27	32,4175	
105	30,7723	5,5473	0,827919	0,560847	10,3594	17,4107	3,1831	2095,32	129,208	1419,41	87,5277	
107,5	60,51496	7,7791	0,827919	0,560847	11,0382	17,4107	3,1831	2324,3	190,779	1574,52	129,237	
110	73,81909	8,5918	0,827919	0,560847	11,2854	17,4107	3,1831	2410,75	214,569	1633,08	145,353	
112,5	83,82168	9,1554	0,827919	0,560847	11,4568	17,4107	3,1831	2471,66	231,496	1674,34	156,82	
115	88,43176	9,4038	0,827919	0,560847	11,5323	17,4107	3,1831	2498,75	239,069	1692,7	161,949	

Таблиця 4 – Результати програмного моделювання при відхиленні частоти

Результати розрахунків			Результати програмного моделювання									
$f_{\text{ном}}, \%$	$D_f, \text{Гц}^2$	$\sigma_f, \text{Гц}$	$\cos\phi$	$\sin\phi$	$I, \text{А}$	$X_L, \text{Ом}$	$X_C, \text{Ом}$	$m_P, \text{Вт}$	$\sigma_P, \text{Вт}$	$m_Q, \text{ВАр}$	$\sigma_Q, \text{ВАр}$	
98,8	0,033656437	0,18346	0,827673	0,561211	8,66975	17,4221	3,18102	1579,58	5,29893	1070,04	2,11628	
99	0,031759011	0,17821	0,82768	0,5612	8,66982	17,4218	3,18108	1579,59	5,1473	1070,04	2,05571	
99,2	0,028191967	0,16790	0,827694	0,56118	8,66996	17,4211	3,1812	1579,59	4,849952	1074,04	1,93677	
99,4	0,022126468	0,14875	0,82772	0,561142	8,67023	17,4199	3,18141	1579,59	4,29643	1070,04	1,71587	
99,6	0,009665499	0,09831	0,827787	0,561042	8,67094	17,4168	3,18199	1579,59	2,83958	1070,05	1,13403	
99,8	0,001507312	0,03882	0,827867	0,560924	8,67178	17,4131	3,18266	1579,59	1,12129	1070,05	0,447814	
100	0,00000	0,0000	0,827919	0,560847	8,67232	17,4107	3,1831	1579,6	0,000688	1070,05	0,000594	
100,2	0,001507312	0,03882	0,827971	0,56077	8,67287	17,4083	3,18354	1579,6	1,1213	1070,04	0,447855	
100,4	0,009665499	0,09831	0,828051	0,560653	8,67371	17,4046	3,18421	1579,61	2,83967	1070,04	1,13429	
100,6	0,022126468	0,14875	0,828119	0,560553	8,67442	17,4015	3,18479	1579,61	4,29665	1070,03	1,71646	
100,8	0,028191967	0,16790	0,828145	0,560515	8,67468	17,4003	3,185	1579,62	4,82981	1070,03	1,93754	
101	0,031759011	0,17821	0,828158	0,560494	8,67483	17,3997	3,18512	1579,62	5,14762	1070,02	2,05657	
101,2	0,033656437	0,18346	0,828165	0,560484	8,6749	17,3993	3,18518	1579,62	5,29927	1070,02	2,11719	

σ_p – середньоквадратичне відхилення активної потужності, Вт;

m_Q – математичне сподівання реактивної потужності, ВАр;

σ_Q – середньоквадратичне відхилення реактивної потужності, ВАр.

За табл. 4 побудуємо відповідні графіки залежностей на рис. 5 та 6.

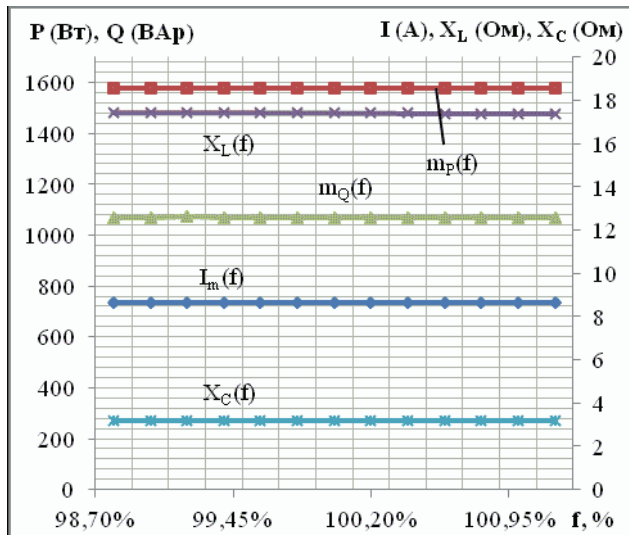


Рисунок 5 – Графіки залежностей $m_p(f)$, $m_Q(f)$, $I_m(f)$, $X_L(f)$, $X_C(f)$

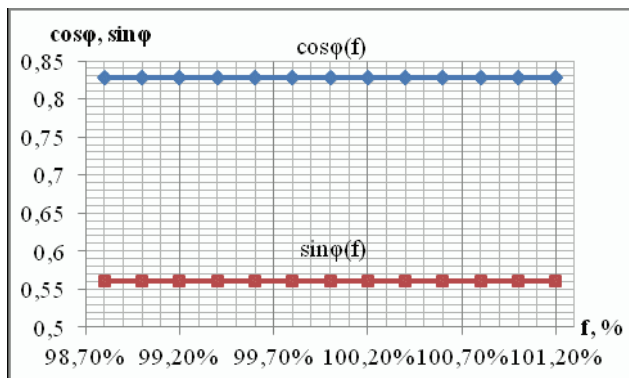


Рисунок 6 – Графіки залежностей $\cos \varphi(U)$, $\sin \varphi(U)$

З побудованих залежностей видно, що відхилення частоти в означених вище межах майже не впливає на значення активної та реактивної потужності та інші параметри електричного кола. Зростання/зменшення величини частоти в електричній мережі майже не призводить до змін активної та реактивної потужності.

Відповідно до формул (1) і (2) та враховуючи формули (3) – (6), за умови $t = \text{const}$, коливання частоти в розглянутих межах майже не змінить покази лічильників активної та реактивної енергії.

Висновки. Розглянуто розподілення напруги і частоти, які мають місце в електричних мережах. За даними вимірювань побудовано графіки залежностей $p(U)$ та $p(f)$. Використовуючи аналіз за критерієм Пірсона, показано, що з отриманих графіків видно, що напруга і частота є випадковими величинами, які змі-

нюються у певному діапазоні і підкорюються Гаусівському закону розподілу.

Використовуючи числові характеристики випадкових величин (математичне сподівання, дисперсія, середньоквадратичне відхилення) було проаналізовано вплив відхилень напруги (в межах $\pm 15\%$) та частоти (в межах $\pm 1,2\%$) на покази індукційних лічильників активної та реактивної електроенергії, за умови, що $t = \text{const}$ (розглядається певний фіксований проміжок часу).

Аналіз було здійснено за допомогою програми, написаної на програмній мові С в середовищі Borland C++ 3.1. В якості електричної мережі розглянуто електричне навантаження, яке має активно-реактивний характер (реактивна складова має індуктивно-ємнісний характер).

Використовуючи програмне моделювання в середовищі Borland C++ 3.1, з'ясували, що зміни величини електричної напруги можуть призводити до значних змін споживання електричної енергії, а, відповідно, і до змін показів індуктивних лічильників електроенергії (до $-44,33\%$ у випадку відхилення у бік -15% та до $+58,19\%$ у випадку відхилення у бік $+15\%$).

Зміни величини частоти майже не впливають на результати показів індуктивних лічильників електроенергії (до $0,0013\%$ у випадках відхилення у на рівні $\pm 1,2\%$).

Виходячи з отриманих результатів, можна зробити висновок, що регулювання напруги на ввіді електроприймача є доцільним. Це дозволить не лише запобігти пошкодженню електрообладнання та зменшенню його терміну служби (наприклад, АД, які чутливі до змін напруги), але і запобігти змінам показів приладів обліку електроенергії.

Список літератури: 1. Ланцов А. Показатели качества электрической энергии: отклонение напряжения // E-Audit. n. d. – Режим доступа : <http://www.e-audit.ru/quality/deviation.shtml>. – Дата звертання : 10 жовтня 2015. 2. Шевченко С. Ю. Актуальність урахування впливу показників якості напруги при обліку електричної енергії / С. Ю. Шевченко, В. В. Волохін, І. М. Дяговченко, Д. М. Макуха // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 20 (1129). – С. 156–157. 3. Селивахин А. И. Эксплуатация электрических распределительных сетей / А. И. Селивахин, Р. Ш. Сагутдинов. – М.: Высшая школа, 1990. – 238 с. 4. ГОСТ13109-97 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения». 5. Ананичева С. С. Качество электроэнергетики. Регулирование напряжения и частоты в энергосистемах: учебное пособие / С. С. Ананичева, А. А. Алексеев, А. Л. Мызин. – 3-е изд., испр. Екатеринбург: УрФУ, 2012. – 93 с. 6. Конденсатор Last One // Корпорация «Тетра»: электронный каталог продукции. 2014. – Режим доступа : http://tetraCorp.com.ua/kondensatori/puskovie/p_lastone/last1000mF330v. – Дата звертання: 15 жовтня 2015. 7. Барбаро П. В. Характеристики счетчиков реактивной энергии в системах электроснабжения с искажениями / П. В. Барбаро, А. Каталиотти, В. Козентино, С. Нуксио // Труды XVIII Всемир. Конгресса ИМЕКО «Метрология для стабильного развития». – Рио-де-Жанейро, 17-22 вересня 2006. 8. Victor D. Kernel Density Estimation of the Unknown Probability Density Function / D. Victor // MQL5, 4 червня 2012. – Режим доступа: <https://www.mql5.com/en/articles/396>. – Дата звертання : 18 жовтня 2015. 9. Shakirov Sh. R. Nonperturbative Approach to Finite-Dimensional Non-Gaussian Integrals / Sh. R. Shakirov // Springer New York. Theoretical and Mathematical Physics. – 2010. – № 163. – С. 804–812. 10. Sung Y. Park Maximum Entropy Autoregressive Conditional Heteroskedasticity Model / Y. Park, Sun, Anil K. Bera // El-sevier B. V. Journal of Econometrics. – 2009. – № 150. – С. 219–222.

Bibliography (transliterated): 1. Lantsov A. Pokazately kachestva elektrycheskoy enerhyy: otklonenye napryazhenyya. E-Audit, n. d. Web. 10 October 2015 <<http://www.e-audit.ru/quality/deviation.shtml>>. 2. Shevchenko S. Yu., V. V. Volokhin, I. M. Dyahovchenko and D. M. Makukha "Aktualnist urakhuvannya vplyvu pokaznykiv yakosti napruhy pry obliku elektrychnoyi enerhyi." Vestn. Har'k. politehn. in-ta. Ser.: Tekhn. Ta elektrofizyka vysokyykh napruh. No. 20. 2015. 156–157. Print. 3. Selyvakhyn A. Y. and R. Sh. Sahutdynov Ekspluatatsyya elektrycheskykh raspredelytelnykh setey. Moscow: Vysshaya shkola, 1990. Print. 4. HOST 13109-97 "Normy kachestva jelektricheskoy jenerghii v sistemah jelektrosnabzheniya obshhego naznachenija". 5. Ananycheva S. S., A. A. Alekseev and A. L. Myzyn Kachestvo elektroenerhyy. Rehulyrovanye napryazhenyya y chastote v enerhosystemakh. Ekaterynburh:UrFU, 2012. Print. 6. Kondensator Last Web. 15 October 2015

<http://tetracorp.com.ua/kondensatori/puskovie/p_lastone/last1000mF330v>. 7. Barbaro P. V., A. Katalyotty, V. Kozentyno and S. Nuksyo "Kharakterystyky schetchykov reaktyvnoy enerhyy v systemakh e-lektrosnabzhenyya s yskazhenyyamy" XVIII World Conderence IMEKO "Metrolohyya dlya stablynoho razvytyya". Ryo-de-Zhaneyro, 17-22 September 2006. 8. Victor D. Kernel Density Estimation of the Unknown Probability Density Function. MQL5, 4 June 2012. Web. 18 October 2015. <<https://www.mql5.com/en/articles/396>>. 9. Shakirov Sh. R. "Nonpreturbative Approach to Finite-Dimensional Non-Gaussian Integrals." Springer New York. Theoretical and Mathematical Physics. No. 163. 2010. 804–812. Print. 10. Sung Y. Park and Anil K. Bera "Maximum Entropy Autoregressive Conductional Heteroskedasticity Model." Elsevier B. V. Journal of Econometrics. No 150. 2009. 219–222. Print.

Надійшла (received) 26.08.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Шевченко Сергій Юрійович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «ХПІ», професор кафедри передачі електричної енергії; тел.: (050) 291-44-51; e-mail: syurik42@rambler.ru.

Shevchenko Serhiy Yuriyovych – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "KPI", Full Professor at the Department of transmission of electric energy; tel.: (050) 291-44-51; e-mail: syurik42@rambler.ru.

Волохін Віталій Васильович – кандидат технічних наук, доцент, Сумський державний університет, доцент кафедри електроенергетики; тел.: (095) 104-08-90; e-mail: vetvol-13@rambler.ru.

Volokhin Vitaliy Vasylovych – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Sumy State University, Associate Professor at the Department of Electroenergetics; tel.: (095) 104-08-90; e-mail: vetvol-13@rambler.ru.

Лебедка Сергій Миколайович – кандидат технічних наук, Сумський державний університет, старший викладач кафедри електроенергетики; тел.: (066) 842-20-33; e-mail: lebedka_serg@ukr.net.

Lebedka Serhiy Mykolayovych – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Sumy State University, Senior Lecturer at the Department of Electroenergetics; tel.: (066) 842-20-33; e-mail: lebedka_serg@ukr.net.

Дяговченко Ілля Миколайович – Сумський державний університет, аспірант кафедри електроенергетики; тел.: (095) 728-04-78; e-mail: diahovchenko5@inbox.ru.

Diahovchenko Illia Mykolayovych – Sumy State University, postgraduate at the Department of Electroenergetics; tel.: (095) 728-04-78; e-mail: diahovchenko5@inbox.ru.

Качан Максим Віталійович – Сумський державний університет, аспірант кафедри електроенергетики; тел.: (099) 906-03-25; e-mail: adamant-fff@yandex.ru.

Kachan Maksym Vitaliyovych – Sumy State University, postgraduate at the Department of Electroenergetics; tel.: (099) 906-03-25; e-mail: adamant-fff@yandex.ru.