

ДОСЛІДЖЕННЯ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ОЦІНКИ ВІДХИЛЕННЯ ТА КОЛИВАННЯ НАПРУГИ МЕРЕЖІ ЗА ПАРАМЕТРАМИ ЇЇ СПЕКТРУ

Запропоновано імітаційну модель контролю показників якості електроенергії та проаналізовано їх зміни залежно від умов функціонування споживача. Алгоритм базується на використанні дискретної трансформації Фур'є, а саме на визначенні енергетичної спектральної щільності сигналу. Відхилення та коливання напруги мережі наявні при різкозмінних навантаженнях, що породжує амплітуду огинаючої, частота якої є значно нижча від частоти мережі.

Умовні позначення

n	– інтервал квантування за часом миттєвого значення $u(t)$ несинусоїдної напруги;
N	– число вибірок за період T дії дискретизованої напруги $u(t)$;
U_m, f_m, ψ_m	– відповідно амплітуда, частота та фазовий кут живильної напруги $u(t)$;
$U(n)=[U_0, U_1, \dots, U_{N-1}]^T$	– матриця стовпчик, складена із значень напруг $u(n)$ при кожній вибірці;
$m_p = \frac{U_m}{U_\Omega}$	– коефіцієнти, що враховують глибину модуляції;
$U_\Omega, \Omega_p, \xi_p$	– амплітуда, частота та початкова фаза огинаючої напруги $u(t)$ ($f_m \gg \Omega$);
$S(k)$	– спектральна щільність живильної напруги k -ої гармоніки.

Практичне впровадження державних стандартів України (ДСУ) на якісні показники електроенергії поставило задачу створення методів та алгоритмів, що дозволяють за допомогою комп'ютерів визначати декілька параметрів якісних показників електроенергії (ЕЕ) [1]. Під якістю ЕЕ розуміють ступінь відповідності її параметрів певним встановленим нормам значень. Параметром ЕЕ називають величину, котра кількісно характеризує яку-небудь її властивість. Норми якості ЕЕ встановлюють за показниками її якості – величинами, котрі визначають якість енергії за одним або кількома її параметрами.

Згідно з класифікаційною ознакою, часовим розподілом, серед показників якості ЕЕ виділено статичні та динамічні показники [2]. До статичних показників належать, серед інших, повільні відхилення і коливання частоти повторення та середньоквадратичного значення (СКЗ) напруги в електричних мережах [1].

Такі відхилення, в першу чергу, залежать від коливання напруги, обумовленої різкозмінними навантаженнями. У практичних випадках для оцінки допустимості коливання напруги необхідно виділити в огинаючій живильної напруги її зміни, що характеризує відхилення напруги в мережах електропостачання.

Аналіз останніх досліджень засвідчив, що для розв'язання даної задачі в основному використовують три підходи. Перший із них проводиться на основі періодичних вимірювань напруги мережі з наступною статистичною обробкою отриманих даних [3],[4].

Другий метод ґрунтується на роздільному формуванні стабільної системи, наприклад, трифазної, номінальних напруг і системи із заданими значеннями параметра якості ЕЕ з подальшим їхнім підсумуванням [5].

Алгоритм, запропонований авторами, базується на використанні дискретної трансформації Фур'є і конкретно на визначенні енергетичної спектральної щільності, яка є, на переконання авторів, інваріантним ядром для визначення якісних показників ЕЕ [6],[7].

Мета статті (постановка задачі) полягає в дослідженні імітаційної моделі оцінки відхилення та колювання напруги мережі за параметрами її спектру. Запропонований алгоритм має низку переваг. Матрична форма його представлення зручна для обробки на комп'ютері, наприклад, з використанням математичного пакета MathCad. Алгоритм зручний для побудови імітаційної моделі для оцінки відхилення та колювання напруги в реальному масштабі часу. Для побудови такої системи використано алгоритм швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) та дані з реального об'єкта, що живиться напругою промислової мережі.

Відомо, що значення напруги для несинусоїдних режимів та різкозмінних навантажень за допомогою аналого-цифрового перетворювача подається наступним дискретним кодом:

$$U(n) = \sum_{m=1}^M U_m \sin\left(\frac{2\pi \cdot f_m \cdot n}{N} + \psi_m\right). \quad (1)$$

З врахуванням останнього для сигналу $U(n)$, що представлений дискретними вибірками, пряме перетворення Фур'є має вигляд [7]:

$$S(k) = \sum_{n=0}^{N-1} U(n) \exp^{-j\frac{2\pi \cdot n \cdot k}{N}}, \quad (2)$$

або в тригонометричній формі:

$$S(k) = \sum_{n=0}^{N-1} \left(U(n) \cos \frac{2\pi \cdot n \cdot k}{N} - jU(n) \sin \frac{2\pi \cdot n \cdot k}{N} \right) = A - jB.$$

У промислових мережах з різкозмінними навантаженнями живильні несинусоїдні напруги представляють огинаючою кривою, від зміни якої залежать відхилення та колювання напруги. Вивчимо вплив амплітуди огинаючої, частота якої є значно нижча від основної складової ($f_m=50$ Гц), на спектральні характеристики багатогармонічної напруги.

Для цього використаємо тригонометричну інтерпретацію для апроксимації виразу (2). Розділення на уявну та дійсну частини апроксимованого перетворення Фур'є приводить до виразу, який для різних значень k можна записати у вигляді матриці:

$$\bar{S}(k) = (\bar{X} - j\bar{Y})^T \bar{U}_n \quad [7], \quad (3)$$

де

$$\bar{X} = \begin{bmatrix} x_{01} & x_{02} & \dots & x_{0k} \\ x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{(N-1)1} & x_{(N-1)2} & \dots & x_{(N-1)k} \end{bmatrix};$$

$$\bar{Y} = \begin{bmatrix} y_{01} & y_{02} & \dots & y_{0k} \\ y_{11} & y_{12} & \dots & y_{1k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_{(N-1)1} & y_{(N-1)2} & \dots & y_{(N-1)k} \end{bmatrix} -$$

матриці дійсних та уявних значень спектральних щільностей розміром

$$(N-1) \cdot k; \quad x_{ij} = \cos\left(\frac{2\pi \cdot n_i \cdot k_j}{N}\right); \quad y_{ij} = -\sin\left(\frac{2\pi \cdot n_i \cdot k_j}{N}\right) -$$

елементи матриць $i=(0,1,\dots,(N-1)); j=(1,2,\dots,k)$.

Беручи до уваги, що при різкозмінних навантаженнях живильна несинусоїдна напруга подається огинаючою кривою, то для її періодичного характеру та з врахуванням виразу (1) можна записати:

$$U(n) = \left[U_m \sin\left(\frac{2\pi \cdot f_m \cdot n}{N} + \psi_m\right) \right] \cdot \left(1 + m_p \sin\left(\frac{2\pi \cdot \Omega_p \cdot n}{N} + \xi_p\right) \right). \quad (4)$$

Запропонована імітаційна модель контролю відхилення та коливання напруги (в подальшому інтегральних характеристик), побудована на основі реалізації залежності (2), де $U(n)$ дорівнює правій частині виразу (4), алгоритмом ШПФ. На основі цього алгоритму створений поточний ШПФ-процесор. Суть побудови процесора полягає в наступному.

У ШПФ-процесорі базові операції (додавання, віднімання відповідних вибірок сигналу, що досліджується, і множення повертаючих множників на отримані результати) виконуються поетапно. Таким чином, наприкінці кожного етапу формується матриця вигляду:

$$\bar{S}(k) = \bar{F}_N \cdot \bar{U},$$

де $\bar{U} = [U_0, U_1, \dots, U_{N-1}]^T$; $\bar{S}(k) = [S_0, S_1, \dots, S_{N-1}]^T$ – вектори розміром $N \times 1$, елементи якої визначають інформацію етапу;

\bar{F}_N – матриця дискретних експоненціальних функцій N -го порядку з елементами $f_{k,n} = W^{k \cdot n} = \exp(-j \cdot \pi \cdot k \cdot n / N)$ (повертаючі множники);

$$k, n = 0, 1, 2, \dots, N-1.$$

Нехай необхідно дослідити інтегральні характеристики для $k=30$, тоді у відповідності до теореми Котельникова, інтервал квантування за часом $n=1/2f_B$, для $f_B=1500$ Гц, а кількість відліків за період $T=0,02$ с становить $N=60$.

У пристрої застосовано ШПФ-процесор при основі 4 і проріджуванням за частотою при нормальному порядку поступлення відліків на вході і чотири-інверсних – на виході [8]. Тоді для виконання умови $N=4^2$ ($N=64$) необхідно здійснити виконання базових операцій в три етапи. Прийmemo, що за командою від пристрою управління (ПУ) через масштабний перетворювач (МПер) у цифровому вигляді з аналогово-цифрового перетворювача (АЦП) поступають відліки досліджуваної напруги U_0, U_1, \dots, U_{63} в перший оперативно-запам'ятовуючий пристрій (ОЗП1) і нехай вони будуть сформовані у матричному вигляді:

$$\bar{U} = \begin{bmatrix} U_0 & U_{16} & U_{32} & U_{48} \\ U_1 & U_{17} & U_{33} & U_{49} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ U_{15} & U_{31} & U_{47} & U_{63} \end{bmatrix}.$$

Тоді в такій же послідовності за допомогою першого мультиплексора (МХ1) вони будуть подані на перший арифметико-логічний пристрій (АЛП1), на виході якого отримаємо чотири матриці вигляду:

$$\bar{R}_1 = \bar{U} \cdot \bar{E}_1; \bar{L}_1 = \bar{U} \cdot \bar{E}_2; \bar{P}_1 = \bar{U} \cdot \bar{E}_3; \bar{G}_1 = \bar{U} \cdot \bar{E}_4,$$

$$\text{де } \bar{E}_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}; \bar{E}_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ -j \\ -1 \\ j \end{bmatrix}; \bar{E}_3 = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \end{bmatrix}; \bar{E}_4 = \begin{bmatrix} 1 \\ j \\ -1 \\ -j \end{bmatrix} \text{ – одиничні матриці стовпці.}$$

У першому блоці множення (БМ1) проходить множення значень повертаючих множників, які поступають з першого постійно-запам'ятовуючого пристрою (ПЗП1), на отримані матриці, тобто:

$$\bar{A}_1 = \bar{W}^0 \cdot \bar{R}_1; \bar{B}_1 = \bar{W}^{(p-1)} \cdot \bar{L}_1; \bar{C}_1 = \bar{W}^{(2q-2)} \cdot \bar{P}_1; \bar{D}_1 = \bar{W}^{(3m-3)} \cdot \bar{G}_1,$$

де

$$\bar{W}_0 = \text{diag}(1,1,\dots,1); \quad k = (p-1); \quad p = 1, 2, \dots, 16;$$

$$\bar{W}^{(p-1)} = \text{diag}[1, (0.995 - j0.098), \dots, (0.098 - j0.995)];$$

$$k = (2q-2); \quad q = 1, 2, \dots, 16;$$

$$\bar{W}^{(2q-2)} = \text{diag}[1, (0.98 - j0.195), \dots, (-0.98 - j0.195)];$$

$$k = 3m - 3; \quad m = 1, 2, \dots, 16;$$

$$\bar{W}^{(3m-3)} = \text{diag}[1, (0.957 - j0.29), \dots, (-0.29 + j0.957)].$$

Аналогічним чином після другого етапу будуть отримані наступні матриці:

$$\bar{R}_2 = \bar{V} \cdot \bar{A}_1; \quad \bar{L}_2 = \bar{V} \cdot \bar{B}_1; \quad \bar{P}_2 = \bar{V} \cdot \bar{C}_1; \quad \bar{G}_2 = \bar{V} \cdot \bar{D}_1;$$

$$\text{де } \bar{V} = \begin{bmatrix} \bar{E}_5 & \bar{E}_5 & \bar{E}_5 & \bar{E}_5 \\ \bar{E}_5 & -\bar{E}_5 & \bar{E}_5 & -\bar{E}_5 \\ \bar{E}_5 & \bar{E}_5 & \bar{E}_5 & E_5 \\ \bar{E}_5 & -E_5 & \bar{E}_5 & -E_5 \end{bmatrix}; \quad \bar{E}_5 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ – одинична матриця,}$$

що є підматрицею блочної матриці \bar{V} ;

$$\bar{A}_2 = \bar{T} \cdot \bar{R}_2; \quad \bar{B}_2 = \bar{T} \cdot \bar{L}_2; \quad \bar{C}_2 = \bar{P}_2; \quad \bar{D}_2 = \bar{G}_2,$$

$$\text{де } \bar{T} = \begin{bmatrix} \bar{W}_0 & \bar{O} & \bar{O} & \bar{O} \\ \bar{O} & \bar{W}^{(4\varphi-4)} & \bar{O} & \bar{O} \\ \bar{O} & \bar{O} & \bar{W}^{(8\varphi-8)} & \bar{O} \\ \bar{O} & \bar{O} & \bar{O} & \bar{W}^{(12\varphi-12)} \end{bmatrix};$$

$\bar{W}^{(4\varphi-4)}$, $\bar{W}^{(8\varphi-8)}$, $\bar{W}^{(12\varphi-12)}$ – діагональні матриці, що є підматрицями квазидіагональної матриці \bar{T} ;

$$k = (4\varphi-4); \quad \varphi = 1, 2, 3, 4; \quad \bar{W}^{(4\varphi-4)} = \text{diag}[1, (0.924 - j0.383), \dots, (0.383 - j0.924)];$$

$$k = (8\varphi - 8); \varphi = 1, 2, 3, 4; \quad \overline{W}^{(8\varphi-8)} = \text{diag}[1, (0.707 - j0.707), \dots, (-0.707 - j0.707)];$$

$$k = (12\varphi - 12); \varphi = 1, 2, 3, 4; \quad \overline{W}^{(12\varphi-12)} = \text{diag}[1, (0.383 - j0.924), \dots, (-0.924 + j0.383)];$$

$$\overline{O} = \begin{bmatrix} O & O & O & O \\ O & O & O & O \\ O & O & O & O \\ O & O & O & O \end{bmatrix} \text{ — нульова матриця, що є підматрицею квазідіагональної матриці } \overline{T}.$$

Після третього етапу ШПФ отримаємо матрицю наступного вигляду:

$$\overline{A}_3 = \overline{H} \cdot \overline{A}_2; \quad \overline{B}_3 = \overline{H} \cdot \overline{B}_2; \quad \overline{C}_3 = \overline{H} \cdot \overline{C}_2; \quad \overline{D}_3 = \overline{H} \cdot \overline{D}_2,$$

$$\overline{H} = \begin{bmatrix} \overline{I} & O & O & O \\ O & \overline{I} & O & O \\ O & O & \overline{I} & O \\ O & O & O & \overline{I} \end{bmatrix}; \quad \overline{I} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \text{ — квадратна матриця, що є підматрицею}$$

квазідіагональної матриці \overline{H} .

Таким чином, на виході поточного ШПФ-процесора буде отриманий поточний спектр напруги, що досліджується, тобто:

$$\overline{A}_3 = [S_{0+16i}, \dots, S_{4+16i}, \dots, S_{8+16i}, \dots, S_{12+16i}]^T;$$

$$\overline{B}_3 = [S_{1+16i}, \dots, S_{5+16i}, \dots, S_{9+16i}, \dots, S_{13+16i}]^T;$$

$$\overline{C}_3 = [S_{2+16i}, \dots, S_{6+16i}, \dots, S_{10+16i}, \dots, S_{14+16i}]^T;$$

$$\overline{D}_3 = [S_{3+16i}, \dots, S_{7+16i}, \dots, S_{11+16i}, \dots, S_{15+16i}]^T,$$

де $i = 0, 1, 2, 3$.

За командою від пристрою управління за допомогою мультиплексора MX2 значення поточного спектра поступають на другий ОЗП2.

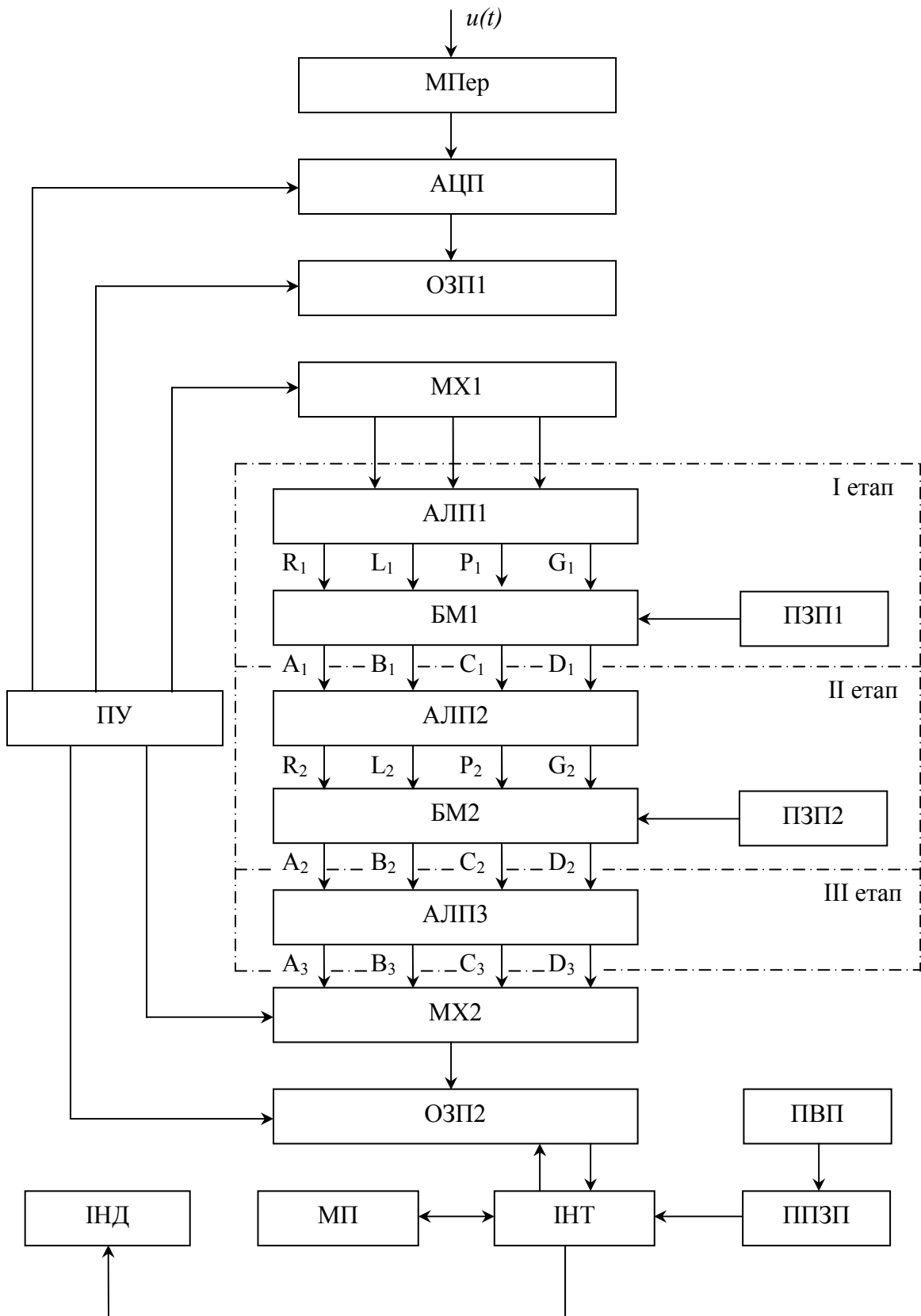


Рис. 1. Блок-схема реалізації імітаційної моделі

Оскільки на виході ШПФ-процесора отримуємо поточний спектр досліджуваної напруги в чотири-інверсному вигляді, то перед виконанням подальших обчислень необхідно здійснити перестановку його членів у відповідно до чотири-інвертованого коду їх номера, тобто:

$$\bar{S}^T_{(k)} = \bar{Q}^{inv6} \cdot [S_0, S_4, \dots, S_{12}, S_1, S_5, \dots, S_{13}, S_2, S_6, \dots, S_{14}, S_3, S_7, \dots, S_{15}],$$

де \bar{Q}^{inv6} – матриця перестановки розмірності $N \times N$, при перемноженні якої на матрицю-стовбець відбувається перестановка у відповідності із чотири-інвертованим кодом їх номерів.

Для ШПФ з основою 4 при $N=64$ необхідно виконати 76 множень. Застосування АЛП1, АЛП2, АЛП3 і помножувачів в описаному пристрої забезпечує необхідну продуктивність.

Для виконання подальших обчислень в пристрої передбачено дві магістралі: магістраль даних і магістраль команд.

У магістралі даних інформація надходить від ОЗП2 через інтерфейс (ІНТ) в мікропроцесор (МП), в магістраль команд – в пристрій введення програм (ПВП) через програмований постійно-запам'ятовуючий пристрій (ППЗП) і інтерфейс – в мікропроцесор.

Програма оброблення складається з двох підпрограм. В першій з них реалізуються залежності запропонованого алгоритму визначення спектральних щільностей з виведенням результатів обробки в ОЗП2 для подальшого використання, а в другій обчислюються інтегральні характеристики несинусоїдних напруг промислової мережі.

Модуль спектральної щільності визначається наступним чином [7]:

$$|S_k| = \sqrt{A_k^2 + B_k^2}. \tag{5}$$

Амплітудне значення k -ї гармоніки обчислюється з виразу:

$$U_k = \frac{2 \cdot |S_k|}{N}. \tag{6}$$

Алгоритм, на основі якого побудований ШПФ-процесор, використаний як імітаційна модель для комп'ютера, за допомогою якої визначались інтегральні характеристики живильної напруги мережі. Вихідні дані для розрахунку, що входять у формули (2) та (4), наступні: $N=64$, $k=1$, $U_m=220\text{В}$, $f_m=50$ Гц, $\psi=\xi_m=0$, $m_p=0,09-5,44$, $\Omega_p=1,5$ Гц

Таблиця 1

Значення експериментальних даних, обчислених за формулами (2) та (4)

№ з/п	k	$ S(k) $	$u(t)$ (В)	m_p	ΔU
1	1	$3,865 \cdot 10^3$	120,793	0,09	99,207
2	1	$4,155 \cdot 10^3$	129,832	0,17	90,168
3	1	$4,762 \cdot 10^3$	148,797	0,35	71,203
4	1	$5,754 \cdot 10^3$	179,820	0,67	40,180
5	1	$5,892 \cdot 10^3$	184,11	1,35	35,89
6	1	$5,343 \cdot 10^3$	166,97	2,71	53,03
7	1	$4,261 \cdot 10^3$	133,166	5,44	86,834

На рисунку 2 проілюстровано графік зміни живильної напруги, а в таблиці 1 наведені значення відхилення її від U_m з врахуванням коливань. Такі відхилення напруги визначались за формулою:

$$\Delta U = U_m - u(t),$$

де $u(t)$ – значення живильної напруги в часі спостереження.

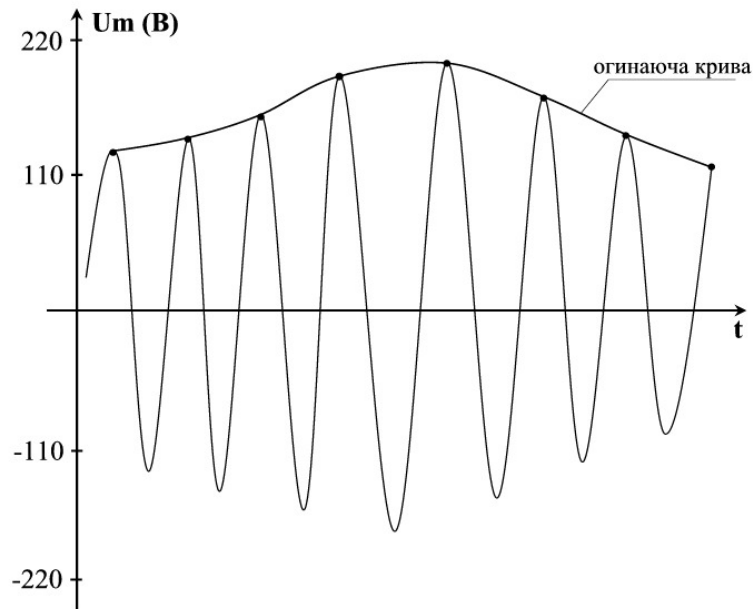


Рис. 2. Осцилограма живильної напруги

Конкретизуємо елементну базу для реалізації імітаційної моделі. В устаткуванні, блок-схема якого показана на рис. 1, застосований восьмирозрядний АЦП паралельно-послідовного типу, що працює в кодї Грея. Він реалізований на мікросхемах К140 та К155. Блоки ОЗП (ОЗП1, ОЗП2, ОЗП3) побудовані на мікросхемах К565РУ2А. Для побудови ПУ та АЛП1, АЛП2, АЛП3 використані мікросхеми К587ИП3 та К155ИП3 відповідно. В устаткуванні застосований мікропроцесор КР587ИК2 та інтерфейс К580ИК55. Програмований постійний запам'ятовуючий пристрій ПЗП та постійні запам'ятовуючі пристрої ПЗП1 та ПЗП2 реалізовані на мікросхемах К556РТ17. Пристрої затримки (на блок-схемі не показані) реалізуються на регістрах зсуву К555ИР9. Мультиплексори МХ1, МХ2 реалізовані на основі інтегральних схем К555КП15. Блоки множення БМ1 та БМ2 побудовані на основі мікросхем К555ИП9. Вхідним масштабним перетворювачем МПер використаний резисторний подільник. Цифрове табло ІНД сумісне з мікропроцесором КР587ИК2 і застосовується як індикатор вихідних сигналів.

Висновки

У запропонованій роботі досліджувалась імітаційна модель оцінки відхилення та коливання напруги мережі за параметрами її спектру. Відхилення та коливання наявні при різкозмінних навантаженнях, що породжує амплітуду огинаючої, частота якої є значно нижча від частоти мережі ($f_m=50$ Гц).

Алгоритм базується на використанні дискретної трансформації Фур'є, а саме на визначенні енергетичної спектральної щільності сигналу. Експериментальні дослідження імітаційної моделі засвідчили, що максимальне відхилення напруги для коефіцієнта модуляції $m_p=0.09$ становить 99,207 В, а мінімальне відхилення напруги для $m_p=1,35$ становить 35,89 В. Матрична форма представлення алгоритму зручна для оброблення на комп'ютерах.

Offered imitating model electric power quality indexes control and analysed their changes dependency on consumer functioning conditions. Algorithm is based on use of discrete Furje transformation, namely on determination of power spectral signal closeness. Deviation and oscillation of network effort available attached to quickly variable loadings, that gives to amplitude rounding, frequency of which is considerably lower from network frequency.

Література

1. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
2. Ванько В., Столярчук П. Проблеми контролю якості електроенергії в електричних мережах. //Міжвідомчий науково-технічний збірник „Вимірювальна техніка та метрологія”. – Львів: НУ „Львівська політехніка”. – 2001. – №58. – С. 47 – 56.
3. Липский А.М., Коляда Л.И. Оценка отклонений напряжения при наличии колебаний его амплитуды. – Минск: – Энергетика, 1981. – №1 – С. 30 – 34.
4. Жежеленко И.В., Рабинович М.Л., Божко В.М. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях. – К.: Техника, 1981. – 160 с.
5. Таранов С.Г., Брайко В.В., Тесик Ю.Ф., Мирфайзиев О.М. Принципы построения прецизионных источников статических показателей качества электроэнергии. – Технічна електродинаміка, 2003. – №4. – С. 38-41.
6. Буняк О.А., Микулик П.М. Дослідження інтегральних показників електроенергії за спектральними параметрами напруги електропостачання. – Харків: “Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства”, 2003. – Випуск 19: Том 1. – С.70-75.
7. Буняк А.М. Использование дискретного преобразования Фурье для определения параметров качества электроэнергии вычислительными устройствами. – Минск: Энергетика, 1982. – №6 – С. 7-12.
8. Буняк А.М., Лупенко А.М., Мовчан Л.Т. Принципы построения алгоритма и микропроцессорного устройства для измерения интегральных характеристик несинусоидальных напряжений и токов промышленной сети. – Минск: Энергетика, 1986. – №3 – С. 12 – 17.

Одержано 02.09.2003 р.