

Ушкаренко О.О.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Малахова Н.Г.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Доманський О.Ю.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ КОНТРОЛЮ КОЕФІЦІЄНТУ НЕСИМЕТРІЇ В МЕРЕЖІ СУДНОВОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ

У статті представлено результати дослідження, спрямованого на розвиток методів та засобів вимірювання та контролю коефіцієнту несиметрії трифазної системи напруг в мережі суднової електроенергетичної системи. Наявність несиметрії напруги зменшує термін експлуатації електродвигунів через виникнення додаткових магнітних полів, що обертаються зустрічно обертанню ротора, знижується ККД судових синхронних генераторів електроенергії. Також несиметрія напруги призводить до підвищення втрат в нульовому проводі при передачі електроенергії. При цьому можливе порушення безперебійного електропостачання важливих судових систем, порушення роботи комп'ютерів у складі пультів судноводіння, навігаційного, радіокомунікаційного та іншого обладнання. Розвиток і удосконалення способів та систем контролю, аналізу та моніторингу показників якості електроенергії, зокрема коефіцієнту несиметрії системи трифазних напруг, в мережі суднової електроенергетичної системи, дозволяє прийняти своєчасні заходи з усунення несиметрії напруг та знизити втрати в мережі. При виконанні дослідження використано методи системного аналізу, метод вимірювання коефіцієнту несиметрії трифазної системи напруг, об'єктно-орієнтований метод розробки програмного забезпечення, методи цифрової обробки сигналів, метод декомпозиції систем, метод синтезу математичних моделей логіко-динамічних процесів контролю і керування.

Для досягнення поставленої в роботі мети проведено аналіз існуючих методів і засобів контролю показників якості електроенергії, зокрема проблеми вимірювання та контролю коефіцієнту несиметрії та шляхів її вирішення. Обґрунтовано необхідність використання вдосконаленого методу вимірювання параметрів напруг в трифазній мережі з використанням підсистеми цифрової обробки сигналів та розрахунку коефіцієнту несиметрії. Вдосконалений метод контролю коефіцієнту несиметрії реалізовано в розробленому програмно-алгоритмічному забезпеченні для мікропроцесорної системи та програмному забезпеченні з графічним інтерфейсом користувача для комп'ютера.

Ключові слова: коефіцієнт несиметрії, суднова електроенергетична система, цифровий фільтр, графоаналітична модель.

Постановка проблеми. Забезпечення високої якості електроенергії є одним з найважливіших завдань при експлуатації суден, адже від неї в значній мірі залежить енергоефективність суднової електроенергетичної системи (СЕЕС) на надійність її роботи. Низька якість електроенергії може мати наслідком неможливість роботи судового навігаційного обладнання, систем радіо- та супутникового зв'язку, багатьох судових машин та механізмів спеціального призначення. Наявність несиметрії напруг в мережі також призводить до скорочення терміну експлуатації обладнання, зокрема асинхронних двигу-

нів, що буде мати наслідком необхідність більш частішої заміни обладнання та значно збільшить витрати на експлуатацію та технічне обслуговування судна. Крім того, несиметрія напруги може призвести до збільшення струму нульового проводу, спрацюванню захисної апаратури і знеструмлення всієї СЕЕС, що є аварійним режимом. Причиною появи несиметрії напруг та струмів в мережі СЕЕС можуть бути наявність однофазного навантаження, несиметричне трифазне обладнання, несправності та погані з'єднання в електричних роз'ємах, та багато інших факторів. Тому актуальним завданням є своєчасне

виявлення факту несиметрії трифазної системи напруг в мережі СЕЕС для прийняття своєчасних заходів з її усунення.

Сучасна електроніка характеризується тісним взаємозв'язком з інформаційними технологіями. Ця обставина дозволяє використовувати програмні засоби та методи інформаційних технологій для вирішення завдань проектування та аналізу електронних систем та окремих підсистем збору та обробки сигналів на якісно новому рівні. Крім того, реалізація в програмних засобах графічного інтерфейсу користувача дозволяє надати оператору інформацію про стан системи в зручному для використання вигляді (в даному випадку у вигляді осцилограм напруг мережі, векторної діаграми та числових значень виміряних та розрахованих параметрів).

Контроль коефіцієнту несиметрії системи трифазних напруг нерозривно пов'язаний з питаннями якості електроенергії, електромагнітної сумісності та енергоефективності в цілому. З огляду на зазначене можна стверджувати, що дослідження, спрямовані на вдосконалення методів та технічних засобів контролю якості електроенергії в судовій мережі, підвищення точності вимірювань та створення відповідного апаратно-програмного інструментарію для вирішення вказаних завдань є достатньо актуальними.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

В даний час в судових електроенергетичних системах велика увага приділяється контролю якості електроенергії. Якість електроенергії характеризується такими параметрами, як коефіцієнт гармонійних спотворень, наявність реактивної потужності, несиметрія навантаження [1, с. 5; 7, с. 350]. Судові електроенергетичні системи є ізольованими та автономними. Через наявність ненульового імпедансу джерела електроенергії та різного навантаження в трифазній системі може виникнути несиметрія напруги. Якість електроенергії за коефіцієнтом несиметрії вважається такою, що відповідає нормам, якщо сумарна тривалість часу виходу значення коефіцієнту несиметрії за допустимі значення (2 %) становить не більше 1 год. 12 хв. за добу. Крім того, повинні бути відсутніми вимірювання, що виходять за гранично допустимі значення (4 %) [1, с. 13]. Для електродвигунів через виникнення додаткових магнітних полів, що обертаються зустрічно обертанню ротора, знижується термін їх роботи на 10-15 %. Знижується коефіцієнт корисної дії генераторів електроенергії. Також несиметрія напруги призводить до підвищення втрат в нульовому проводі при пере-

дачі електроенергії. При цьому можливе порушення безперебійного електроспоживання, порушення роботи комп'ютерів та іншого обладнання [2, с. 667]. Тому актуальним завданням є удосконалення системи для вимірювання та контролю показників якості електроенергії, зокрема коефіцієнту несиметрії, мережі судової електроенергетичної системи.

В роботі [3, с. 350] відзначено все більш широке використання електротяги на судах суднах, що призводить до значного віку нелінійних навантажень в системі із-за наявності приводів із змінюваною частотою. Також в [3, с. 358] проведений розрахунок показників якості електроенергії, заснований на результатах моделювання. Разом з тим, не розглянуті варіанти апаратної реалізації системи вимірювання коефіцієнту несиметрії та алгоритми програмної реалізації методів обробки сигналів, доведені до готових технічних рішень. В роботі [4, с. 194] виконано дослідження впливу обриву нейтрального проводу на величину несиметрії напруги та споживачів електроенергії. Відзначена важливість і необхідність наявності засобів контролю коефіцієнту несиметрії. Запропоновані в [4, с. 196] рішення корисні при проектуванні енергосистем. Дослідження, що проводиться в цій роботі, забезпечує контроль і своєчасне виявлення факту несиметрії напруги.

В роботі [5, с. 36] досліджено вплив несиметрії напруги на величину моменту асинхронного двигуна та його режими роботи. Були проведені дослідження для 8 різних типів несиметрії. При цьому використовувався метод симетричних складових. Аналіз результатів дослідження [6, с. 2; 7, с. 43] показав, що для мінімізації апаратних засобів доцільно виконати вимірювання характеристик фазних напруг з наступним розрахунком діючих значень лінійних напруг.

Напруга живлення в мережі СЕЕС повинна мати синусоїдну форму з постійним значенням амплітуди і частоти [8, с. 81]. Однак, як було зазначено вище, через наявність ненульового імпедансу джерела електроенергії, різного навантаження в трифазній системі може виникнути несиметрія напруг. Проведений в [9, с. 4] огляд і аналіз якості електроенергії в СЕЕС підтверджує актуальність проблеми контролю якості електроенергії. При цьому також відзначена невирішена проблема впливу коливань частоти напруги на точність вимірювань. Тому важливим завданням також є розробка структури підсистеми цифрової обробки сигналів, яка б мінімізу-

вала вплив коливань вхідної напруги на точність вимірювання. В роботі [10, с. 669] зазначено, що не всі виробники обладнання для вимірювання показників якості електроенергії дотримуються стандартів при розробці своїх пристроїв. Крім того, як зазначено в роботах [11, с. 1421; 12, с. 117], при невідповідності частоти дискретизації сигналу частоті напруги мережі, сигнали оцифровуються некогерентно. Запропоноване в роботі [11, с. 1423] рішення, отримане в аналітичній формі, характеризується високими обчислювальними витратами.

Постановка завдання. Проведений аналіз літературних джерел показав, що в даний час методи контролю параметрів електроенергії, зокрема коефіцієнту несиметрії трифазної системи напруг, мають резерви для вдосконалення шляхом врахування особливостей процесів перетворення даних, що відбуваються в мікропроцесорних вузлах цифрових систем управління. Невирішеним залишається завдання представлення процесів перетворення аргументів, які беруть участь в різних алгоритмах програм, з метою їх оптимізації, зокрема збільшення швидкості виконання арифметичних операцій. Особливо актуальним це є для систем керування реального часу.

Розвиток мікропроцесорної техніки та її широке використання в різноманітних системах керування призводить до необхідності використання аналітичних засобів та сучасних досягнень інформаційних технологій для аналізу та синтезу різноманітних систем керування. Для цього

потрібне представлення процесів перетворення сигналів в системах керування в аналітичному вигляді, і вдосконалення формалізованих методів їх обробки з урахуванням контексту використання та виникаючих при цьому проблем.

Метою дослідження є розвиток і вдосконалення методу контролю, аналізу та моніторингу показників якості електроенергії, зокрема коефіцієнту несиметрії системи трифазних напруг, в мережі суднової електроенергетичної системи, що дозволить прийняти своєчасні заходи з усунення несиметрії напруг та знизити втрати в мережі СЕЕС.

При проведенні наукового дослідження використано методи системного аналізу, метод вимірювання коефіцієнту несиметрії трифазної системи напруг, об'єктно-орієнтований метод розробки програмного забезпечення, методи цифрової обробки сигналів, методи теорії цифрових автоматів, метод декомпозиції систем, метод синтезу математичних моделей логіко-динамічних процесів контролю і керування.

Виклад основного матеріалу дослідження. На рис. 1. представлені експериментально отримані осцилограми лінійних напруг суднової мережі (суховантаж Chelsea-6 класу "Волго-Дон макс", дедвейт 6000 т.) при роботі керованого трифазного напівпровідникового випрямляча (схема Ларіонова) у складі електроприводу судових механізмів. Живлення випрямляча відбувалося від одного синхронного генератора потужністю 130 кВт. Потужність наванта-

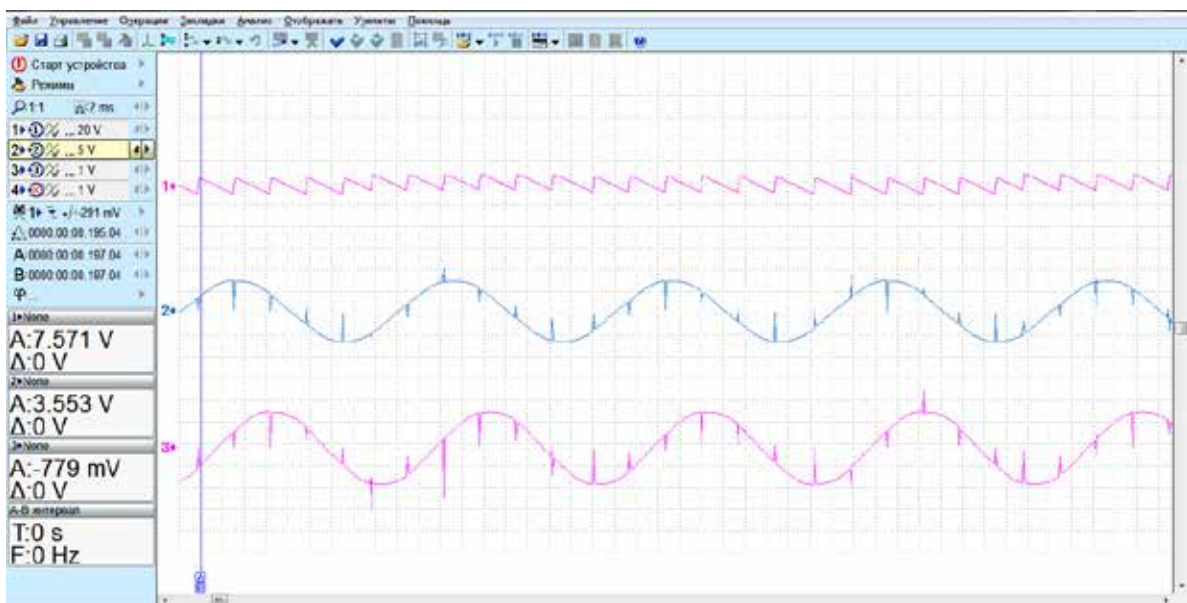


Рис. 1. Осцилограми лінійний напруг U_{AB} та U_{AC} в мережі суднової електростанції при роботі напівпровідникового трифазного випрямляча, підключеного до мережі

ження складала 30 кВт. Характер навантаження активно-індуктивний.

Як видно з осцилограм, в мережі суднової електростанції присутні височастотні завади, які впливають на точність вимірювань діючих значень напруг, і, відповідно, точність розрахунку коефіцієнту несиметрії. Для обчислення середнього і середньоквадратичного значень періодичного сигналу при забезпеченні оптимальної швидкодії дискретної системи виконано синтез підсистеми цифрової обробки сигналів.

Арифметичне середнє значення змінного сигналу з періодом T розраховується за формулою [12, с. 107; 13, с. 318]:

$$u_{avg} = \frac{1}{T} \int_0^T |u(t)| dt. \quad (1)$$

Вираз для розрахунку середнього значення в дискретній формі має вигляд [12, с. 108]:

$$Y(kT_s) = \sum_{n=0}^{N-1} h \cdot X[(k-n)T_s],$$

де

$$Y = u_{avg}, \quad X = |u|, \quad \frac{1}{N} = h, \quad N = \frac{T}{2 \cdot T_s}.$$

Це рівняння описує лінійний фільтр з імпульсною характеристикою кінцевої тривалості порядку N . Для синтезу структури цифрового фільтру було використано метод опису структур цифрових фільтрів шляхом багаторівневої декомпозиції [15, с. 143], перевагою якого є підвищений інформаційний зміст отриманих графоаналітичних моделей структур цифрових фільтрів, що дозволить в майбутньому спростити їх програмну реалізацію. Формулу (1) можна записати у вигляді графоаналітичного виразу, наведеного на рис. 2.

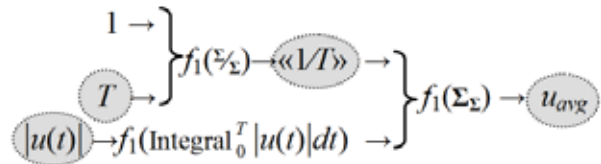


Рис. 2. Графоаналітичний вираз, що описує процес інтегрування сигналу та визначення середнього значення періодичного сигналу

Вираз для розрахунку середнього значення в дискретній формі [12, с. 108]:

$$u_{avg}(t) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |u(t - nT_s)|. \quad (2)$$

Формулу (2) можна записати у вигляді графоаналітичного виразу, наведеному на рис. 3.

Для отримання кінцевого результуючого аргументу $Y(kT_s)$ необхідно виконати перетворення вхідних аргументів відповідно до графоаналітичного виразу, наведеного на рис. 4.

Представлений на рис. 5 графоаналітичний вираз описує лінійний фільтр з імпульсною характеристикою кінцевої тривалості.

Для обчислення чергового значення на виході оптимізованого цифрового фільтру необхідно виконати 3 операції додавання і одну операцію множення, замість N операцій додавання і N операцій множення. Ввівши додаткові функціональні блоки A^2 і \sqrt{A} , розглянуту структуру цифрового фільтру для розрахунку діючого значення напруги з рівними ваговими коефіцієнтами можна використовувати для обчислення діючого (середньоквадратичного) значення вхідного сигналу. Встановлено, що ефективність даного оптимізованого цифрового фільтру є нелінійною і залежить від

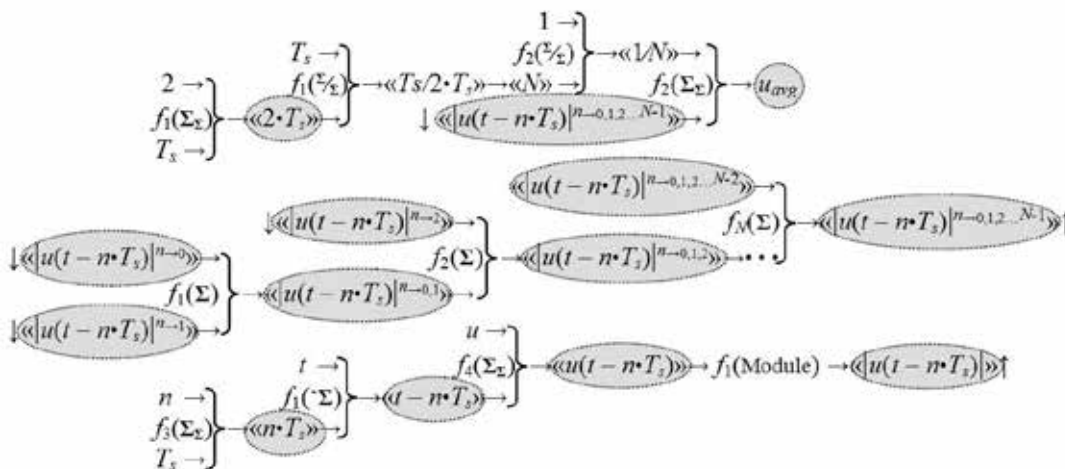


Рис. 3. Графоаналітична модель процесу обчислення середнього значення сигналу, представленого в дискретній формі

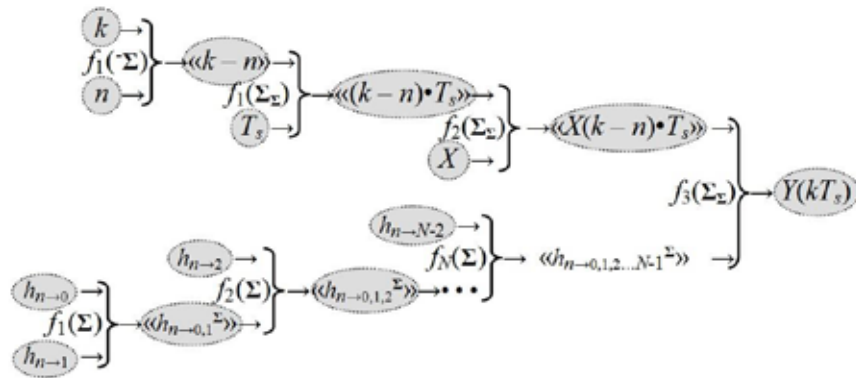


Рис. 4. Графоаналітичний вираз, що описує процедуру перетворення вхідних аргументів

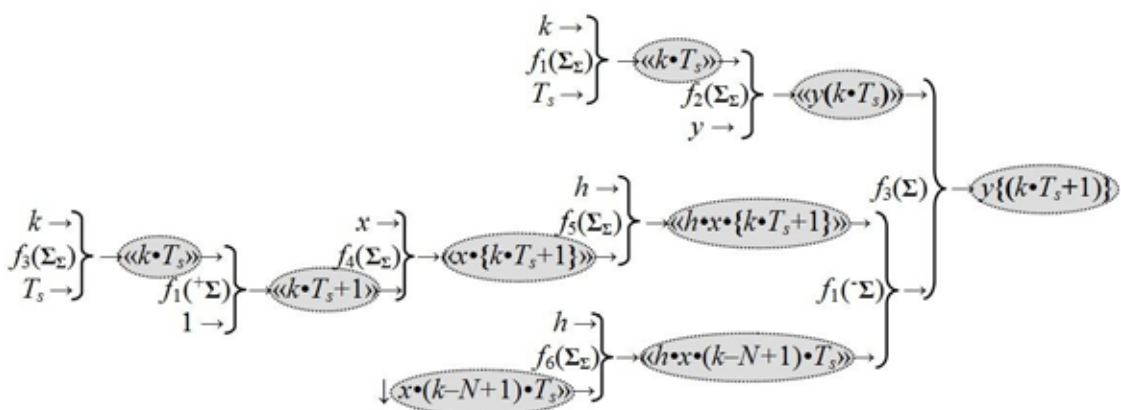


Рис. 5. Графоаналітична модель лінійного цифрового фільтра з кінцевою імпульсною характеристикою

порядку фільтра. Для малих значень порядку цифрових фільтрів їх продуктивність майже однакова, проте зі збільшенням порядку фільтрів ефективність фільтра з оптимізованою структурою різко зростає. Це важливо, оскільки розглянутий алгоритм призначений для реалізації в 8-бітних мікроконтролерах. Збільшення частоти дискретизації в оптимізованій структурі фільтра не призводить до зростання кількості арифметичних операцій додавання і множення, що є перевагою запропонованої структури фільтра в порівнянні з аналогічними.

Одним із завдань системи моніторингу якості електроенергії є розрахунок та передача автоматизованій системі управління по запиті оператора коефіцієнтів несиметрії за нульовою послідовністю [1, с. 19]:

$$K_{0U} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N K_{0U(i)}^2}{N}} \quad (3)$$

і зворотною послідовністю [1, с. 18]:

$$K_{2U} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N K_{2U(i)}^2}{N}}, \quad (4)$$

де $K_{0U(i)}$ і $K_{2U(i)}$ – відповідні коефіцієнти, отримані на основі даних i -го спостереження; N – кількість спостережень на інтервалі усереднення (відповідно до [1, с. 16] інтервал усереднення дорівнює 3 сек. і N має бути не менше 9). Математичний вираз (3) можна записати в аналітичному вигляді, як наведено на рис. 6.

На рисунку $f_1(\Sigma), f_2(\Sigma), \dots, f_i(\Sigma)$ – функціональні структури суматорів; $f_1(\sqrt{\Sigma})$ – функціональна структура подільовача; $f_i(\sqrt{\Sigma})$ – функціональна структура для обчислення квадратного кореня. Особливістю аналітичного виразу, наведеного на рис. 6 є однозначна послідовність виконуваних дій. Аналогічним чином можна представити математичний вираз (4).

Для розрахунку коефіцієнта несиметрії напруг ефективним з точки зору подальшої практичної реалізації на базі мікроконтролера або програмо-

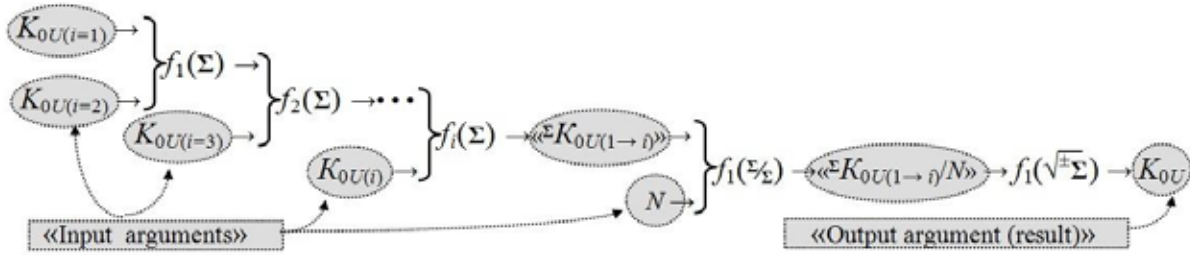


Рис. 6. Аналітичний вираз для розрахунку K_{0U}

ваної логічної інтегральної схеми є використання наступних виразів, наведених в [6, с. 3]:

$$K_U = \sqrt{A^2 + B^2}, \quad (5)$$

$$A = \frac{2U_{AB} - U_{BC} - U_{CA}}{U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}}, \quad (6)$$

$$B = \frac{\sqrt{3}(U_{BC} - U_{CA})}{U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}}, \quad (7)$$

де U_{ab} , U_{bc} і U_{ca} – вимірні діючі значення лінійної напруги мережі. Математичний вираз (7) може бути записаний у вигляді аналітичного виразу (рис. 7).

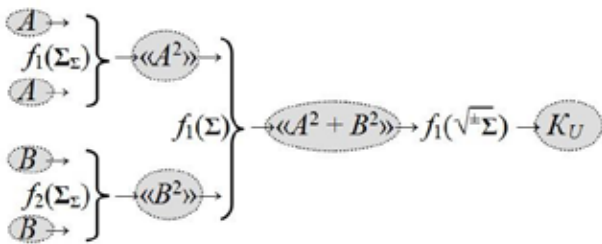


Рис. 7. Аналітичний вираз для розрахунку K_U

На рис. 7 показано, що з використанням функціональних структур помножувачів $f_1(\Sigma_z)$ і $f_2(\Sigma_z)$ отримуються проміжні аргументи « A^2 » і « B^2 » для обчислення за допомогою функціональної структури суматора $f_1(\Sigma)$ проміжного аргументу « $A^2 + B^2$ », який є входним аргументом функціональної структури обчислення квадратного кореня $f_1(\sqrt{\Sigma})$ для отримання вихідного (результуючого) аргументу K_U .

Математичний вираз (6) може бути записано у вигляді, наведеному на рис. 8

За допомогою функціональної структури помножувача $f_1(\Sigma_z)$ отримується проміжний аргумент « $2 \cdot U_{ab}$ », який спільно з входними аргументами послідовно подається на другі входи функціональних структур віднімання $f_1(\Sigma)$ і $f_2(\Sigma)$ для отримання перетвореного аргументу « $2 \cdot U_{ab} - U_{bc} -$

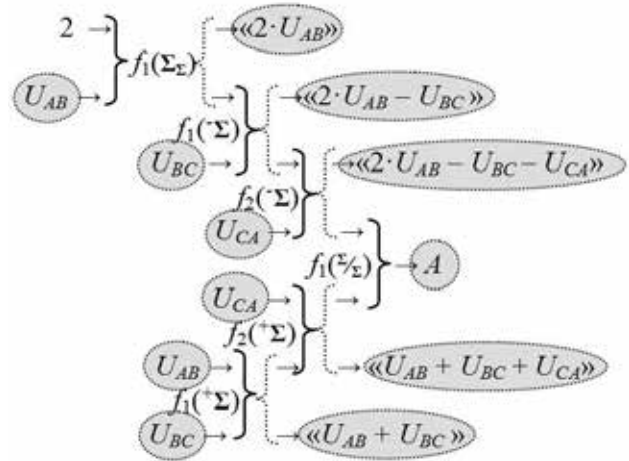


Рис. 8. Аналітичний вираз для розрахунку проміжного аргументу A

U_{ca} » і подачі його на перший вхід функціональної структури подільовача $f_1(\Sigma_z)$ з метою отримання результуючого аргументу A . Одночасно з цією процедурою, на другий вхід функціональної структури подільовача $f_1(\Sigma_z)$ поступає проміжний результат (аргумент) « $U_{ab} + U_{bc} + U_{ca}$ », який отримано за допомогою функціональних структур суматорів $f_1(\Sigma)$ і $f_2(\Sigma)$ з входніми аргументами U_{ab} , U_{bc} і U_{ca} .

Математичний вираз (7) може бути записаний у вигляді, наведеному на рис. 9.

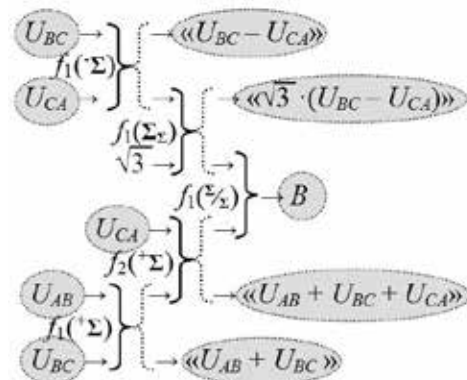


Рис. 9. Аналітичний вираз для розрахунку проміжного аргументу B

$$\begin{aligned}
 & \left\langle \frac{\langle U_{A(i)}^2 - 2 \cdot U_{A(i)} \cdot U_{B(i)} \cdot \cos \varphi_{AB(i)} \rangle}{\Sigma} \right\rangle \rightarrow f_1(\sqrt{\Sigma}) \rightarrow U_{AB(i)} \\
 & \left\langle \frac{\langle U_{B(i)}^2 - 2 \cdot U_{B(i)} \cdot U_{C(i)} \cdot \cos(\varphi_{AB(i)} - \varphi_{AC(i)}) \rangle}{\Sigma} \right\rangle \rightarrow f_1(\sqrt{\Sigma}) \rightarrow U_{BC(i)}
 \end{aligned}$$

(а)

(б)

Рис. 10. Аналітичні вирази для розрахунку лінійних напруг:
а – напруги $U_{BC(i)}$; б – напруги $U_{AB(i)}$

На рис. 9 показано, що за допомогою функціональної структури для віднімання $f_1(\Sigma)$, формується перетворений аргумент « $U_{bc}-U_{ca}$ » для подальшого обчислення за допомогою функціональної структури помножувача $f_1(\Sigma_{\Sigma})$ аргументу « $\sqrt{3} \cdot (U_{bc}-U_{ca})$ ». Це значення використовується для отримання, разом з використанням першого вхідного зв'язку функціональної структури подільвача $f_1(\frac{\Sigma}{\Sigma})$, результуючого аргументу B . При цьому, на другий вхідний зв'язок функціональної структури дільника $f_1(\frac{\Sigma}{\Sigma})$ поступає проміжний аргумент « $U_{ab}+U_{bc}+U_{ca}$ », який отримано за допомогою функціональних структур суматорів $f_1(+\Sigma)$ і $f_2(+\Sigma)$ з вхідними аргументами U_{ab} , U_{bc} і U_{ca} .

Таким чином, однією з вимог до апаратних засобів системи моніторингу якості електроенергії є можливість вимірювання лінійної напруги мережі. Однак, для забезпечення наочності відображення несиметрії напруг необхідно мати значення як мінімум одного з кутів між векторами фазної напруги. Оскільки між векторами фазних і лінійних напруг присутній однозначний взаємозв'язок, у роботі для мінімізації апаратних засобів запропоновано вимірювання характеристик векторів фазних напруг з подальшим розрахунком значень діючих лінійних напруг.

Результуючий аргумент $U_{ab(i)}$ може бути записаний у вигляді аналітичного виразу, наведеному на рис. 10, а. Результуючий аргумент $U_{bc(i)}$ може бути записаний у вигляді аналітичного виразу, наведеному на рис. 10, б.

В процесі виконання дослідження були розроблені програми для мікроконтролера і комп'ютера. Програми виконують вимірювання, розрахунок і відображення параметрів про діючі значення

вимірюваних напруг, кутів зсуву фаз між ними, розраховані значення коефіцієнтів несиметрії по прямій, зворотній та нульовій послідовностям.

На рис. 11 наведений зовнішній вигляд графічного інтерфейсу програми при заданих у моделі фазних напругах $U_A = 220\text{В}$, $U_B = 223\text{В}$, $U_C = 230\text{В}$, кутах зсуву фаз 0° , 110° , 245° відповідно, частоті напруги мережі 50 Гц.

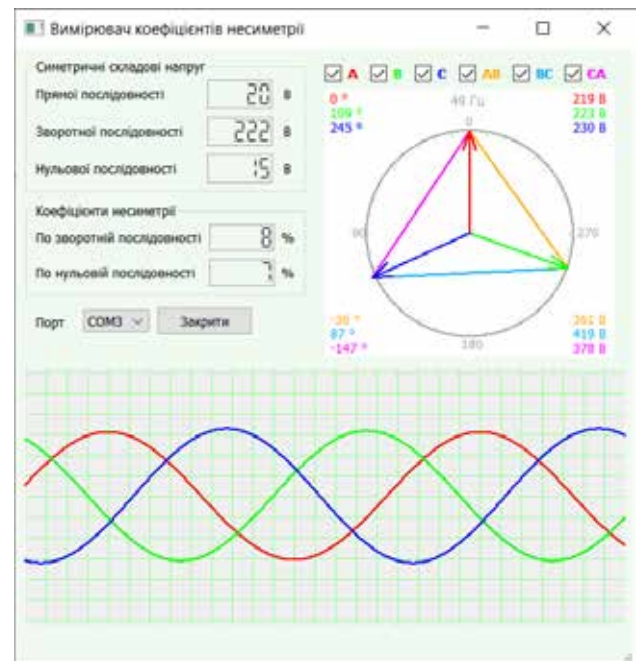


Рис. 11. Візуалізація несиметрії напруг та результатів розрахунків в розробленій програмі

Як було зазначено вище, контроль коефіцієнту несиметрії системи трифазних напруг нерозривно пов'язаний з питаннями якості електроенергії, електромагнітної сумісності та енергоефектив-

ності. Своєчасне виявлення факту несиметрії дозволить прийняти необхідні заходи по зменшенню несиметрії системи трифазних напруг з використанням спеціальних пристроїв, що в поєднанні з іншими методами та технічними засобами, розглянутими в [16, с. 77; 17, с. 14; 18, с. 28; 19, с. 96], позитивно вплине на енергоефективність СЕЕС системи в цілому.

Висновки. Отримані графоаналітичні вирази для розрахунку коефіцієнту несиметрії, в яких використовуються діючі значення фазних напруг, дозволили мінімізувати апаратні засоби, необхідні для отримання сигналів. Також це забезпечило більш високу швидкодію розробленої системи, оскільки вона забезпечена трьома нуль-органами, сигнали з яких надходять до мікроконтролера для обробки та визначення фазових зсувів. На практиці реалізовано покращену перешкодозахищеність системи за рахунок незалежності вимірюваних кутів зсуву фаз між лінійними напругами від форми напруги мережі.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що отримав подальший розвиток метод вимірювання коефіцієнту несиметрії системи трифазних напруг шляхом додаткового використання оптимізованої структури підсистеми цифрової обробки сигналів, що було досягнуто завдяки формуванню графоаналітичної форми записи процедури перетворення інформаційних аргументів на функціональних структурах. Це дозволило

покращити перешкодозахищеність системи за рахунок незалежності вимірюваних кутів зсуву фаз між лінійними напругами від форми напруги мережі, та реалізувати цей метод програмно в електронному пристрої на сучасній елементній базі (мікроконтролері).

Практичне значення отриманих результатів полягає в можливості використання розглянутого методу формування математичних моделей графоаналітичних виразів для синтезу оптимізованих структур цифрових фільтрів. З використанням цього методу виконана оптимізація структури системи цифрової обробки сигналів для визначення середнього і середньоквадратичного значень напруги. Розроблено програмно-алгоритмічний комплекс системи вимірювання коефіцієнту несиметрії. Програмне забезпечення реалізовано у вигляді цифрового автомату, який виконує керування процесом вимірювання необхідних параметрів (діючих значень лінійних напруг та кутів зсуву фаз між ними) та розрахунку коефіцієнтів несиметрії. При цьому наявність графічного інтерфейсу користувача дозволяє представити результати у зручному для оператора вигляді (векторної діаграми, осцилограми та числових значень). Використання розробленої системи для визначення коефіцієнту несиметрії дозволяє вжити своєчасні заходи щодо усунення несиметрії напруги та знизити втрати в мережі суднової електроенергетичної системи на 10-15 %.

Список літератури:

1. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения : ГОСТ 13109-97. – [Дата введения с 01.01.1999 г.]. Минск : ИПК Издательство стандартов, 1998. 35 с. (Межгосударственный стандарт).
2. Barros J. A review of measurement and analysis of electric power quality on shipboard power system networks / J. Barros, R. I. Diego // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 62. P. 665-672.
3. Rodrigues T.A. Impact of electric propulsion on the electric power quality of vessels / T.A. Rodrigues, G.S. Neves, L.C.S. Gouveia, M.A. Abi-Ramia, M.Z. Fortes, S. Gomes // *Electric Power Systems Research*. 2018. Vol. 155. P. 350-362.
4. Lepadat I. Effect of the neutral interruption on the unbalanced three-phase consumers / I. Lepadat, E. Helerea, S. Abagiu // In Proc. of the Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) 2014 International Conference. Brasov, Romania, 2014. P. 192-197.
5. Youb L. Effects of Unbalanced Voltage on the Steady State of the Induction Motors. *International Journal of Electrical Energy*. 2014. Vol. 2, Issue 1. P. 34-38.
6. Способ измерения коэффициента несимметрии и устройство для его осуществления: пат. 1308947 СССР. № 4009588; заяв. 21.01.1986; опубл. 07.05.1987, Бюл. № 17. 4 с.
7. Mahmoud M. S. Al-Suod. Development of hardware and software for calculation and monitoring of the unbalance factor in threephase voltage system / Al-Suod Mahmoud M. S. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 1 (91). P. 39-45.
8. Simić M. Design and evaluation of computer-based electrical power quality signal generator / M. Simić, Z. Kokolanski, D. Denić, V. Dimcevic, D. Živanović, D. Taskovski // *Measurement*. 2017. Vol. 107. P. 77-88.
9. Georgios Vokas. Analysis of power quality field measurements and considerations on the power quality standard / Vokas Georgios, Langouranis Panagiotis, Kontaxis Panagiotis, Topalis Frangiskos // *Journal of Applied Research Review*. 2015. P. 1-13.

10. Zhu Y. A Method of Detecting Measurement Uncertainty of Voltage Unbalance / Y. Zhu, X. Liang Huang, F. Xin // *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 805. P. 667-672.
11. Tarasiuk T. Impact of sampling frequency on accuracy of unbalance factor measurement by DFT / T. Tarasiuk, A. Pilat // in *Proc. of the IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, Pisa, Italy, 2015. P. 1420-1424.
12. Рябенський В.М. Программная реализация алгоритмов цифровой обработки сигналов : монографія / В.М. Рябенський, А.О. Ушкаренко // Николаев : НУК, 2016. 244 с.
13. Ian Grout, *Digital Systems Design with FPGAs and CPLDs*. Oxford : Newnes. 2008. 784 p.
14. Ушкаренко О.О. Вдосконалення методу побудови графоаналітичних моделей компонентів електронних кіл / О.О. Ушкаренко, Н.Д. Малахова // Збірник тез доповідей XIII Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології і автоматизація – 2020» (Одеса, 22-23 жовтня 2020 р.), Одеська нац. акад. харч. технологій. Одеса: ОНАХТ, 2020. С. 43-45.
15. Ushkarenko O. Development of Graphical Analytical Models for Digital Signal Processing System Structures / O. Ushkarenko, Mahmoud M.S. Al-suod [et al.] // *Jordan Journal of Electrical Engineering*, Volume 6, Number 2, 2020. – P. 140-153.
16. Ямненко Ю.С. Вплив якості електроенергії на економічні характеристики ізолюваних MicroGrid / Ю.С. Ямненко, Т.О. Терещенко, І.С. Федін, Л.Є. Клепач // *Технічна електродинаміка*. 2020. № 4. С. 76-79.
17. Павлов Г. В. Резонансные преобразователи в энергоэффективных электротехнических системах / Г.В. Павлов, А.В. Обрубов // *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*. 2014. № 9. Спец. вып. Т.1 : Силовая электроника и энергоэффективность. С. 13-23.
18. Жук О.К. Несинусоїдальність напруги в автономній електроенергетичній системі з керованим фільтрокомпенсуючим пристроєм / О.К. Жук, Д.О. Жук, Д.В. Криворучко // *Технічна електродинаміка*. 2018. № 5. С. 26-30.
19. Шидловський А.К. Стабілізація параметрів електричної енергії в трифазних системах напівпровідниковими коригуючими пристроями / А.К. Шидловський, В.О. Новський, А.Ф. Жаркін. Київ : Ін-т електродинаміки. 2013. 378 с.

Ushkarenko O.O., Malakhova N.G., Domanskiy O.Yu. IMPROVEMENT OF THE METHOD OF THE UNBALANCE FACTOR CONTROL IN THE SHIP POWER SYSTEM NETWORK

The paper presents the results of a research aimed at developing methods and tools for measuring and controlling the unbalance factor of a three-phase voltage system in the ship's power system. The presence of voltage unbalance reduces the service life of electric motors due to the occurrence of additional magnetic fields that rotate counter-rotating rotor, reduces the efficiency of ship synchronous power generators. Also, voltage unbalance leads to increased losses in the neutral wire during power transmission. At the same time, it is possible to disrupt the uninterrupted power supply of important ship systems, disrupt the operation of computers in the consoles, navigation, radio and other equipment. Development and improvement of methods and systems of control, analysis and monitoring of electricity quality indicators, in particular the unbalance factor of the three-phase voltage system in the ship power system, allows to take timely measures to eliminate voltage asymmetry and reduce network losses. Methods of system analysis, method of measuring the unbalance factor of three-phase voltage system, object-oriented method of software development, methods of digital signal processing, method of the system decomposition, method of synthesis of mathematical models of logical-dynamic control processes were used.

To achieve this goal, the analysis of existing methods and means of control of power quality indicators, in particular the problem of measuring and controlling the unbalance factor and ways to solve it, was carried out. The necessity of using an improved method of measuring voltage parameters in a three-phase network using the subsystem of digital signal processing and calculating the asymmetry coefficient is substantiated. An improved method of controlling the unbalance factor is implemented in the developed software and algorithms for the microprocessor system and software with a graphical user interface for the computer.

Key words: unbalance factor, ship power system, digital filter, graphoanalytical model.