

Винахід відноситься до електровимірювальної техніки і може бути використаний для калібрування та налагодження вимірювальних перетворювачів електричних величин промислової електромережі (активна, реактивна потужності, фазні напруги та струми, тощо).

Відомий цифровий трифазний генератор, який має у своєму складі опорний генератор, перший і другий лічильники, низькочастотний генератор, перший і другий лічильники, низькочастотний генератор, задавачі фазових зсувів, фазових модуляцій, амплітуд, амплітудних модуляцій і форми сигналів, блоки оперативного запам'ятовування, суматори і допоміжні суматори, елементи порівняння, цифроаналогові перетворювачі і задавачі масштабу [Авт.св. СССР № 142751, кл. Н 03 В 19/00, від 30.01.88].

Цей генератор має обмежену можливість відтворення довільної форми сигналу та низьку точність формування вихідних сигналів за рахунок неможливості корекції похибок ЦАП і вихідних буферів, які входять у склад ЦАП.

Найбільш близьким до пропонованого є цифровий трифазний генератор полігармонійних сигналів [Авт.св. СССР №1343540, кл. Н 03 В 27/00, від 07.10.87], що містить процесорний пристрій, генератор тактових імпульсів, джерело опорної напруги, перший і другий лічильники, цифровий компаратор, регістр останнього адреса і регістр кода масштабу, ЦАП опорної напруги і три канали формування фазної напруги, магістраль адреса та магістраль даних, при цьому кожний канал формування фазної напруги складається зі з'єднаних послідовно оперативного запам'ятовуючого пристрою миттєвих значень (ОЗП МЗ), регістра біжучого значення, ЦАП миттєвих значень і вихідного підсилювача напруги, причому процесорний пристрій за допомогою магістралі адресу з'єднаний з адресними входами ОЗП МЗ, а за допомогою магістралі даних - з Інформаційними входами ОЗП МЗ, регістра останнього адреса, та регістра коду масштабу, вихід генератора тактових імпульсів з'єднаний з лічильним входом першого лічильника, сигнал переповнення першого лічильника з'єднаний з тактовим входом другого лічильника, а, лінії стану другого лічильника за допомогою магістралі адресу з'єднані з адресними входами ОЗП МЗ та з першим входом цифрового компаратора, до другого входу якого під'єднані виходи регістра коду періода, вихід порівняння цифрового компаратора з'єднаний з входом обнулення другого лічильника, до інформаційних входів ЦАП опорної напруги під'єднані виходи регістра масштабу, його вхід опорної напруги з'єднаний з виходом джерела опорної напруги, вихід ЦАП опорної напруги з'єднаний зі входами опорної напруги ЦАП миттєвих значень.

Точність відомого трифазного генератора визначається похибками масштабуючого ЦАП, ЦАП кожної гармоніки і вихідних сумуючих підсилювачів.

Формування вихідної напруги ЦАП описується наступним виразом:

$$U_{\text{вих.}} - \Delta + U_{\text{оп.}} (1 + \sigma) \frac{N}{N_{\text{оп.}}} \quad (1)$$

де  $\Delta$  і  $\sigma$  - адитивна і мультиплікативна похибки ЦАП;

$N$  - біжучий код миттєвого значення вихідної напруги;

$N_{\text{оп.}} - 2^n - 1$  - максимальний код, який визначається кількістю розрядів ЦАП ( $n$  - кількість розрядів ЦАП);

$U_{\text{вих.}}$  і  $U_{\text{оп.}}$  - вихідна і опорна напруги ЦАП.

По аналогії та з врахуванням, що опорна напруга для ЦАП кожної гармоніки поступає з виходу масштабуючого ЦАП, і виразу (1) для миттєвих значень вихідної напруги  $k$ -ої гармоніки для кожного з вихідних каналів напруг  $A$ ,  $B$ ,  $C$  відомого трифазного генератора можна записати:

$$U_{2\text{вих.}} - \Delta_2 + [\Delta'_2 + U'_{2\text{оп.}} (1 + \sigma_2) \times \\ \times \frac{N'_2}{N'_{2\text{м.}}} ] (1 + \sigma_2) \frac{N_2}{N_{2\text{м.}}} \quad (2)$$

де  $\Delta_2$ ,  $\sigma_2$ ,  $N'_2$ ,  $N'_{2\text{м.}}$  - адитивна і мультиплікативна похибки та біжучий і максимальний код масштабуючого ЦАП відомого трифазного генератора;

$\Delta_2$ ,  $\sigma_2$ ,  $N'_2$ ,  $N'_{2\text{м.}}$  - адитивна і мультиплікативна похибки та біжучий і максимальний код ЦАП  $k$ -ої гармоніки відомого трифазного генератора;

$U'_{2\text{оп.}}$ ,  $U_{2\text{вих.}}$  - опорна напруга масштабуючого ЦАП та вихідна напруга ЦАП  $k$ -ої гармоніки відомого трифазного генератора.

Оскільки біжучі значення  $N$  змінюються синусоподібно, тобто:

$$N_2 - N_{2\text{Ак}} \sin(\omega_k t) \quad (3)$$

де  $N_{2\text{Ак}}$  - код амплітуди  $k$ -ої гармоніки;

$\omega_k$  - кругова частота  $k$ -ої гармоніки, то середньоквадратичне значення напруги вихідного сигналу  $U_{2\text{скз}}$ , за період повторення  $T$  першої гармоніки зформованого сигналу визначається виразом

$$U_{2\text{скз.}} - \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U_{2\text{вих.}}^2(t) dt} \quad (4)$$

$$- \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left\{ \Delta_2 - [\Delta'_2 + U'_{2\text{оп.}} (1 + \sigma_2) \frac{N'_2}{N'_{2\text{м.}}} ] (1 + \sigma_2) \frac{N_{2\text{Ак}}}{N_{2\text{м.}}} \sin \omega_k t \right\}^2 dt}$$

Після спрощень отримаємо

$$U_{2\text{скз.}} - \sqrt{\Delta_2^2 + \left\{ \frac{1}{2} [\Delta'_2 + U'_{2\text{оп.}} (1 + \sigma_2) \frac{N'_2}{N'_{2\text{м.}}} ] (1 + \sigma_2) \frac{N_{2\text{Ак}}}{N_{2\text{м.}}} \right\}^2} \quad (5)$$

Так як Ідеальне середньоквадратичне значення напруги  $U_{2\text{скз.ід.}}$  визначається як то похибка зформованої напруги ЦАП k-ої гармоніки становить

$$U_{2\text{скз.ід.}} = \frac{1}{2} U'_{2\text{оп.}} \frac{N'_2}{N'_{2\text{м}}} \cdot \frac{N_{2\text{Ак}}}{N_{2\text{м}}} \quad (6)$$

$$\delta_2 = \frac{U_{2\text{скз.}} - U_{2\text{скз.ід.}}}{U_{2\text{скз.ід.}}} = \frac{U_{2\text{скз.}}}{U_{2\text{скз.ід.}}} - 1 -$$

$$= \frac{\sqrt{\Delta_2^2 + \left\{ \frac{1}{2} [\Delta'_2 + U'_{2\text{оп.}} (1 + \sigma'_2) \frac{N'_2}{N'_{2\text{м}}} ] (1 + \sigma_2) \frac{N_{2\text{Ак}}}{N_{2\text{м}}} \right\}^2}}{\frac{1}{2} U'_{2\text{оп.}} \frac{N'_2}{N'_{2\text{м}}} \cdot \frac{N_{2\text{Ак}}}{N_{2\text{м}}}} - 1 \quad (7)$$

Похибка формування k-ї гармоніки напруги при типових значеннях:  $N'_2 - N_{2\text{Ак}} - 4000$ ,  $N'_{2\text{м.}} - N_{2\text{м.}} - 4095$ ,  $U'_{2\text{оп.}} - 10,24$  В,  $\Delta'_2 - \Delta_2 - 5$  мВ,  $\delta'_2 - \delta_2 - 0,3\%$  становить  $\delta_2 0,00652127$  або  $\delta_2 - 0,65\%$ .

Загальна похибка формування вихідної напруги одного з каналів А, В або С складається з похибок підготовки кожної k-ої гармоніки та похибок вихідного сумуючого каскаду.

Крім того у відомому трифазному генераторі присутні похибки формування фазних співвідношень між полігармонійними сигналами каналів А, В, С за рахунок обмеженої кількості точок апроксимації та різниці сумарних затримок ЦАП і вихідних вузлів. Слід також відзначити, що в відомому приладі задавання фазних співвідношень між однойменними фазними напругами і струмами здійснюється шляхом зміни комплексного опору навантаження. Тобто, змінюючи співвідношення між реактивною і активною складовими, забезпечується відповідний кут зсуву фази між вихідними сигналами (наприклад  $U_A$  та  $I_A$ ), що не є зручним у користуванні і не забезпечує необхідної точності та стабільності фазових співвідношень та амплітуд вихідних сигналів.

Таким чином з формули (7) видно, що забезпечити високу точність формування вихідних полігармонійних сигналів в відомому пристрою важко, оскільки має місце накопичення похибок вузлів цифро-аналогового перетворення та вихідних каскадів. Крім того в відомому генераторі не можна отримати достатньо точні та стабільні фазові співвідношення між однойменними напругами та струмами внаслідок недосконалого принципу регулювання фази за допомогою зміни комплексного опору навантаження.

В основу винаходу поставлено завдання створити цифровий трифазний генератор полігармонійних сигналів, в якому введення нових елементів та взаємозв'язків, дозволило б підвищити точність формування трифазних полігармонійних сигналів і за рахунок цього більш точно налагоджувати і калібрувати вимірювальні перетворювачі електричних величин промислової електромережі.

Поставлене завдання досягається за рахунок того, що в трифазний генератор полігармонійних сигналів, який має в своєму складі процесорний пристрій, генератор тактових Імпульсів, джерело опорної напруги, перший і другий лічильники, цифровий компаратор, регістр останньої адреси і регістр кода масштабу, ЦАП опорної напруги і три канали формування фазної напруги, магістраль адреси та магістраль даних, причому кожний канал формування фазної напруги складається зі з'єднаних послідовно першого оперативного запам'ятовуючого пристрою миттєвих значень (ОЗС МЗ), першого регістра біжучого значення, першого ЦАП миттєвих значень і вихідного підсилювача напруги, при цьому процесорний пристрій за допомогою магістралі адреси з'єднаний з адресними входами ОЗП МЗ, а за допомогою магістралі даних - з інформаційними входами ОЗП МЗ, регістра останньої адреси та регістра коду масштабу, вихід генератора тактових Імпульсів з'єднаний з лічильним входом першого лічильника, сигнал переповнення першого лічильника з'єднаний з тактовим входом другого лічильника, а лінії стану другого лічильника за допомогою магістралі адреси з'єднані з адресними входами ОЗП МЗ і з, першим входом цифрового компаратора, до другого входу якого під'єднані виходи регістра коду періода, вихід порівняння Цифрового компаратора з'єднаний зі входом обнулення другого лічильника, до інформаційних входів ЦАП опорної напруги під'єднані виходи регістра масштабу, до входу опорної напруги - вихід джерела опорної напруги, а його вихід з'єднаний зі входами опорної напруги ЦАП миттєвих значень, згідно винаходу, додатково містить три канали формування фазних струмів, кожний з яких складається з послідовно з'єднаних другого ОЗП МЗ, другого регістра біжучого значення, другого ЦАП миттєвого значення і вихідного підсилювача струму, та канал зворотного зв'язку, який складається з АЦП, аналогового комутатора, трьох перетворювачів напруга-напруга та трьох перетворювачів струм-напруга, причому до входів аналогового комутатора під'єднані виходи перетворювачів напруга-напруга і струм-напруга, вихід джерела опорної напруги і лінія ОВ, а його вихід з'єднаний з аналоговим входом АЦП, вихід АЦП за допомогою магістралі даних під'єднаний до вхідного порту процесорного пристрою, виходи каналів формування фазних напруг під'єднані до входів перетворювачів напруга-напруга, а виходи формувачів фазних струмів - до входів перетворювачів струм-напруга, лінії стану першого лічильника під'єднані до адресних входів аналогового комутатора.

За рахунок введення нових елементів та взаємозв'язків одержана можливість підвищити точність формування заданих амплітуд гармонік фазних напруг та струмів, фазових співвідношень між ними і, тим самим, збільшити точність формування трифазних полігармонійних сигналів, що, в свою чергу, дає можливість більш точно налагоджувати і калібрувати вимірювальні перетворювачі електричних величин промислової електромережі.

На кресленні представлена схема пропонованого цифрового трифазного генератора.

Цифровий трифазний генератор полігармонійних сигналів має в своєму складі процесорний пристрій 1, канали формування фазних напруг 2,3,4 та струмів 5, 6, 7, канал зворотного зв'язку 8, регістр кода масштабу 9, регістр останньої адреси 10, ЦАП опорної напруги 11, джерело опорної напруги 12, генератор тактових Імпульсів 13, перший 14 та другий 15 лічильники, цифровий компаратор 16, магістраль даних 17, магістраль адреси 18 і трифазні виходи напруги 19 та струму 20, причому кожен канал формування фазних напруг 2,3,4 або струму 5, 6,7 складаються зі з'єднаних послідовно оперативних запам'ятовуючих пристроїв миттєвих значень 21, 22, 23, 24, 25 і 26, регістрів біжучих миттєвих значень 27, 28, 29, 30, 31 132, ЦАП миттєвих значень

33, 34, 35, 36, 37 і 38 та вихідних підсилювачів напруги 39, 40, 41 і струму 42,43,44, а канал зворотного зв'язку 8 складається з перетворювачів напруга-напруга 45, 46 і 47, перетворювачів струм-напруга 48, 49 і 50, аналогового комутатора 51 і АЦП 52.

Двонаправлений порт даних процесорного пристрою і за допомогою магістралі даних 17 під'єднаний до входів даних ОЗП МЗ 21, 22, 23,24, 25, 26 і до входів регістрів кода масштабу 9 та регістра останньої адреси 10. Магістраль адресу 18 з'єднує внутрішню адресну шину процесорного пристрою 1 і адресні входи ОЗП МЗ 21, 22, 23, 24, 25 і 26. Вихід генератора тактових імпульсів 13 під'єднаний до лічильного входу першого лічильника 14, коефіцієнт перерахунку якого 8, вихід переповнення якого під'єднаний до лічильного входу другого лічильника 15, коефіцієнт перерахунку якого більше, ніж максимальна кількість кодів миттєвих значень фазних полігармонійних сигналів за один період формування вихідних сигналів. Виходи стану першого лічильника 14 під'єднані до адресних входів аналогового комутатора 51, а виходи стану другого лічильника 15 - до магістралі адреси 18 і до першого входу цифрового компаратора 16, до другого входу якого під'єднаний вихід регістра останньої адреси 10 а вихід рівності з'єднаний з входом обнулення другого лічильника 15. Інформаційний вхід ЦАП опорної напруги 11 з'єднаний з виходом регістра масштабу 9, вхід опорної напруги - з виходом джерела опорної напруги 12, а аналоговий вихід під'єднаний до входів опорної напруги ЦАП миттєвих значень 33, 34, 35, 36, 37 і 38.

При реалізації даного цифрового трифазного генератора в якості процесорного пристрою і використовується ПЕОМ типу IBMPC. При побудові каналів формування фазних напруг 2, 3 і 4 та струмів 5, 6, 7 ОЗП МЗ 21, 22, 23, 24, 25, 26 виконуються на МС КР537РУ10, регістри миттєвих значень 27, 28; 29, 30, 31 132 та регістр кода масштабу 9 і регістр останньої адреси 10 - на МС К555ІР23. ЦАП миттєвих значень 33,34, 35, 36, 37, 38 і ЦАП опорної напруги 11 побудовані по схемі [Гутников В.С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. - Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1988, с. 61, мал. 2.1] на основі МС К1108ПА1.

Підсилювачі напруги 39, 40, 41 виконуються по схемі [Щербаков В.И., Гроздов Г.И. Электронные схемы на операционных усилителях: Справочник. - К.: Техніка, 1983, С. 18, мал. 1.17а] з включенням на їх виходах трансформаторів напруги. Підсилювачі струму 42, 43, 44 виконуються по схемі [Щербаков В.И., Гроздов Г.И. Электронные схемы на операционных усилителях: Справочник. - К.: Техніка, 1983, с. 133, мал. 7.13] з включенням на їх виходах трансформаторів струму.

При реалізації каналу зворотного зв'язку 8 аналоговий комутатор 51 виконується на МС К590КН6. Перетворювачі напруга-напруга 45, 46, 47 побудовані на трансформаторах напруги, з включенням на їх виходах повторювачів напруги на операційних підсилювачах. Перетворювачі струм-напруга 48, 49, 50 виконуються на трансформаторах струму, вихідні обмотки яких закорочена резисторами. АЦП реалізується на основі МСК1108ПВ2.

Для виконання першого 14 і другого 15 лічильників використовуються МС К555ІЕ18, в якості цифрового компаратора, використовується МС К555СР11. Генератор тактових імпульсів виконується по схемі [Шило В.Л. Популярныe цифровые микросхемы: Справочник. - М.: Радио и связь, 1988, с. 51, мал.1.30а] на основі МС К155ЛН1.

Запропонований цифровий трифазний генератор полігармонійних сигналів працює під управлінням процесорного пристрою 1. На фіг.1 не показані керуючі лінії і функціональні вузли, які забезпечують дешифрацію адреса та організацію циклів обміну даних.

Для формування вихідних полігармонійних сигналів напруги та струму цифровий трифазний генератор необхідно встановити в початковий стан.

За допомогою процесорного блоку 1 (ПЕОМ) формуються еталонні коди  $N_{i \text{ эт.}}$  миттєвих значень фазних напруг і струмів. Вони можуть бути обчислені по заданим алгебраїчним формулам, введені з клавіатури, зчитані з попередньо підготовленого файлу або іншим чином. Стримані дані записуються в відповідні ОЗП МЗ 21, 22, 23, 24, 25, 26, тобто:

$$N_i - N_{i \text{ эт.}}$$

де  $i$  - порядковий номер точки опроксимачії вихідних сигналів.

В регістр кода масштабу 9 записується значення опорної напруги для ЦАП опорної напруги 11, в регістр останньої адреси 10 записується адреса кодів миттєвих значень, останніх в періоді формування вихідних сигналів, і дається дозвіл на генерацію трифазних напруг і струмів.

Функціонування трифазного генератора відбувається наступним чином. Після того, як процесорний пристрій і звільнить адресну магістраль 18, адреса для зчитування з ОЗП МЗ 21, 22, 23, 24, 25, 26 біжучого миттєвого значення формується другим лічильником 15. Зформована генератором тактових імпульсів 13 послідовність синхронізуючих імпульсів подається на перший лічильник 14, який має коефіцієнт перерахунку 8. Сигнал переповнення першого лічильника 14 подається на лічильний вхід другого лічильника 15, коефіцієнт перерахунку якого не менше, ніж максимальна кількість точок акроксимачії вихідних полігармонійних сигналів за період основної гармоніки. Зформований другим лічильником 15 біжуча адреса поступає на адресні входи ОЗП МЗ 21, 22, 23, 24, 25, 26 і одночасно порівнюється на цифровому компараторі 16 з адресою останнього миттєвого значення, записаного в регістрі останньої адреси 10. При співпадінні кодів формується сигнал зкидання для другого лічильника 15 і починається формування наступного періоду вихідних сигналів.

Одночасно з видачею трифазних напруг та струмів, виконується перевірка отриманих рівнів сигналів. Для цього на адресні входи аналогового комутатора 51 подаються сигнали стану першого лічильника 14, таким чином, задаються вісім тактів роботи АЦП 52 в кожному біжучому циклі формування вихідних сигналів. На протязі біжучого циклу видачі миттєвих значень фазних напруг і струмів на АЦП 52 по чергово подаються напруга  $OV$ , опорна напруга  $U_{оп.}$ , а також через відповідні перетворювачі 45, 46, 47, 48, 49, 50 зформовані вихідні сигнали цифрового трифазного генератора. Отримані таким чином дані передаються для аналізу в процесорний пристрій 1.

Отриманий код напруги  $OV$  відповідає адитивній похибці  $A$ , що виникає при формуванні вихідних сигналів. Тобто:

$$A = N_{ov} \quad (9)$$

де  $N_{ov}$  - отриманий код напруги ОВ.

Мультиплікативна похибка  $M$  визначається по формулі:

$$M = \frac{N_{U_{оп.}} - A}{N_o} \quad (10)$$

де  $N_{U_{оп.}}$  - отримане значення опорної напруги;

$N_o$  - відоме значення опорної напруги, Оскільки для АЦП 52 можна записати:

$$N_{i \text{ вих.}} = [A + (1 + M) U_{i \text{ вх.}}] K_{АЦП} \quad (11)$$

де  $N_{i \text{ вих.}}$  - код вихідної напруги АЦП;

$U_{i \text{ вх.}}$  - вхідна напруга АЦП (почергово напруга ОВ, опорна напруга  $U_{оп.}$ , вихідні напруги перетворювачів 45, 46, 47, 48, 49, 50);

$K_{АЦП}$  - еквівалентний коефіцієнт передачі АЦП, то, з урахуванням формул (9) і (10), для відтворення реальних значень вихідних сигналів  $N_{i \text{ р.}}$  необхідно врахувати складові  $A$  і  $M$ , тобто:

$$N_{i \text{ р.}} = \frac{N_{i \text{ вих.}} - A}{1 + M} \quad (12)$$

Таким чином усувається вплив адитивної  $A$  і мультиплікативної похибок  $M$  АЦП 52 на обчислення кодів реальних миттєвих значень фазних напруг та струмів  $N_{i \text{ р.}}$ . Після цього процесорним блоком 1 неперервно оцінюється похибка  $\Pi_i$  формування біжучих значень вихідних сигналів, які містять в собі неточності ЦАП миттєвих значень 33, 34, 35, 36, 37, 38 і вихідних підсилювачів напруги 39, 40, 41 та струму 41, 42, 43:

$$\Pi_i = \dot{N}_{i \text{ ет.}} - N_{i \text{ р.}} \quad (13)$$

Якщо біжуче значення похибки  $\Pi_i$  перевищує наперед задане порогове значення  $\Pi_{п.}$ , то виконується корекція відповідних кодів миттєвих значень полігармонійних сигналів:

$$N_i = N_{i \text{ ет.}} + \Pi_i, \text{ при } |\Pi_i| > \Pi_{п.} \quad (14)$$

де  $\Pi_{п.}$  - порогове значення похибки приладу, яке задається оператором і визначає межі точності формування вихідних сигналів. Мінімальне значення  $\Pi_{п.}$  зумовлене похибками вихідних підсилювачів напруги 39, 40, 41 та струму 41, 42, 43 і каналу зворотного зв'язку 8 запропонованого цифрового трифазного генератора.

Якщо відбувалась корекція кодів миттєвих значень фазних напруг та струмів, то генерація вихідних сигналів переривається і виконується цикл запису зкорегованих кодів  $N_i$  в ОЗП МЗ 21, 22, 23, 24, 25, 26. Після цього дається дозвіл на формування більш точних вихідних полігармонійних сигналів. Оцінка похибки утворення трифазних напруг і струмів може відбуватися постійно, періодично, за командою оператора або тільки після включення приладу. Відповідне програмне забезпечення процесорного пристрою 1 (ПЕОМ) дозволяє побачити біжуче значення  $\Pi_i$ , похибки формування трифазних полігармонійних сигналів.

Похибка формування амплітуди вихідної напруги (або струму) запропонованого трифазного генератора полігармонійних сигналів  $\delta_1$  по аналогії з прототипом та з урахуванням (2) і (7) визначається по формулі:

$$\delta_1 = \frac{\sqrt{\Delta_1^2 + \left\{ \frac{1}{2} [\Delta_1' + U'_{1оп.} (1 + \sigma_1) \frac{N'_{11}}{N'_{1м.}}] (1 + \sigma_1) \frac{N_{1Ак}}{N_{1м.}} \right\}^2}}{\frac{1}{2} U'_{1оп.} \frac{N'_{11}}{N'_{1м.}} \cdot \frac{N_{1Ак}}{N_{1м.}}} - 1 \quad (15)$$

де  $\Delta_1'$ ,  $\sigma_1'$ ,  $N'_{11}$ ,  $N'_{1м.}$  - адитивна і мультиплікативна похибки та біжучий і максимальний код масштабуючого ЦАП запропонованого трифазного генератора;

$\Delta_1$ ,  $\sigma_1$ ,  $N_1$ ,  $N_{1м.}$  - адитивна і мультиплікативна похибки та біжучий і максимальний код ЦАП фазного сигналу запропонованого трифазного генератора;

$U_{1оп.}$ ,  $U_{1вих.}$  - опорна напруга масштабуючого ЦАП та вихідна напруга ЦАП фазного сигналу запропонованого трифазного генератора.

У запропонованому цифровому трифазному генераторі адитивна  $A_i$  і мультиплікативна  $M_i$  похибки ЦАП, що входять до складу приладу, корегуються з точністю до половини його молодшого розряду і становлять:

$$\Delta_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{1оп.}}{N_{1м.}}; \sigma_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{N_{1м.}} \quad (16)$$

або  $\Delta_1 = 1,25$  мВ;  $\sigma_1 = 0,0001221$ .

Оцінимо похибку формування амплітуди вихідної фазної напруги в запропонованому генераторі Із-за неповної корекції похибок ЦАП. При  $N'_{11} = N_1 = 4000$ ,  $N'_{1м.} = N_{1м.} = 4095$ ,  $U'_{1оп.} = 10,24$  В,  $\Delta_1' = \Delta_1 = 1,25$  мВ,  $\sigma_1' = \sigma_1 = 0,01221\%$  отримаємо  $\sigma_1 = 0,000372185$  або  $\sigma_1 = 0,037\%$ .

Для спрощення оцінки результатів обчислень приймемо, що похибки вихідних каскадів в відомому пристрої і в запропонованому цифровому трифазному генераторі однакові. Порівнюючи  $\delta_2$  і  $\delta_1$  отримаємо:

$$\frac{\delta_2}{\delta_1} = \frac{0,00652127}{0,000372185} = 17,521576. \quad (17)$$

Слід відзначити, що крім вищезгаданих похибок мають місце складові кола зворотнього зв'язку: неточності перетворювачів напруга-напруга або струм-напруга і похибки нелінійності АЦП 52. Але можна вважати, що їх внесок в загальну похибку цифрового трифазного генератора є мінімальним і ним можна знехтувати.

Так як АЦП 52 каналу зворотнього зв'язку 8 утворює коди значень вихідних сигналів на протязі біжучого циклу видачі миттєвих значень, то не буде відбуватися зсув по фазі внаслідок того, що використовується один АЦП для обслуговування шести каналів формування фазних сигналів 2, 3, 4, 5, 6, 7. Тобто фазні спотворення форми вихідних сигналів знаходяться в межах загальної похибки приладу. Також слід відзначити, що послідовність опитування АЦП миттєвих значень вихідних сигналів вибрана таким чином, щоб уникнути впливу перехідних процесів, викликаних перезарядом паразитних ємностей ЦАП миттєвих значень 33, 34, 35, 36, 37, 38 і вихідних підсилювачів напруги 39, 40, 41 та струму 42, 43, 44.

Таким чином, в запропонованому цифровому трифазному генераторі полігармонійних сигналів в 17,5 раза підвищена, точність формування вихідних сигналів в порівнянні з відомим пристроєм.

Крім цього, використання ПЕОМ в даному генераторі полегшує управління приладом, дозволяє гнучко і оперативно змінювати спосіб відображення Інформації і характеристики вихідних сигналів.

