



УКРАЇНА

(19) UA

(11) 55988

(13) A

(51) 7 G01R21/01

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ

## ОПИС

ДО ДЕКЛАРАЦІЙНОГО ПАТЕНТУ  
НА ВІНАХІДВИДАЄТЬСЯ ПІД  
ВІДПОВІДАЛЬНІСТЬ  
ВЛАСНИКА  
ПАТЕНТУ

## (54) СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ ДІЙСНОГО ЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПОТУЖНОСТІ

1

2

(21) 2002086618

(22) 09 08 2002

(24) 15 04 2003

(46) 15 04 2003, Бюл. №4, 2003 р

(72) Кондратов Владислав Тимофійович, Богдано-  
ва Ольга Олександрівна(73) КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ТЕХНОЛОГІЙ ТА ДИЗАЙНУ

(57) Спосіб визначення дійсного значення електричної потужності, який полягає в тому, що перетворюють напругу  $u_d(t)$  на навантаженні і струм  $i_d(t)$  через нього в перший та другий інформативні електричні сигнали, формують сумарний  $u_{\Sigma}(t)$  та різницевий  $u_{\Delta}(t)$  сигнали шляхом додавання та віднімання інформативних електричних сигналів, подають сформовані електричні сигнали на перший і другий резистивні нагрівальні елементи з відомими і рівними між собою значеннями опорів  $R_{H1}$  і  $R_{H2}$ , перетворюють електричний струм  $I'$  і  $I''$  відповідно у теплову потужність  $P'$  і  $P''$ , по закінченні заданого проміжку часу перетворюють теплову потужність  $P'$  і  $P''$  у частоти  $f'$  і  $f''$  першого та другого електричних сигналів, вимірюють їх, запам'ятовують та визначають дійсне значення електричної потужності за рівнянням вимірювань, який відрізняється тим, що перед перетворенням електричного струму у теплову потужність формують першу, другу і третю стабілізовані та калібровані за значеннями напруги  $U_{01}$ ,  $U_{02}$  і  $U_{03}$ , причому значення напруги  $U_{02}$  формують меншим за значення напруги  $U_{01}$  на калібровану за значенням величину  $\Delta U_0$ , а значення третьої напруги  $U_{03}$  формують більшим за значення напруги  $U_{01}$  на значення тієї ж величини  $\Delta U_0$ , обчислюють і запам'ятовують каліброване значення електричної потужності  $P_0(\{P_0\}=\{U_{01}\}^2/\{R_H\}=\{I_H\}^2\{R_H\})$  при напрузі  $U_{01}$ , виділяють на першому і другому резистивних нагрівальних елементах теплову потужність  $P'_1$  і  $P''_1$  при нульових значеннях струмів  $I'_1$  і  $I''_1$  через них ( $\{I'_1\}=\{I''_1\}=\{I_1\}=0$ ), по закінченні заданого проміжку часу  $\Delta t$  перетворюють теплову потужність  $P'_1$  і  $P''_1$  у частоти  $f'_1$  і  $f''_1$  першого та другого електричних сигналів  $u'_1(t)$  і  $u''_1(t)$  відповідно, після вимірювання та запам'ятовування значень цих частот подають другу калібровану за значенням напругу  $U_{02}$  на перший і другий нагрівальні елементи, перетво-

рюють струми  $I'_2$  і  $I''_2$  через них у теплову потужність  $P'_2$  і  $P''_2$ , по закінченні заданого проміжку часу  $\Delta t$  перетворюють теплову потужність  $P'_2$  і  $P''_2$  у частоти  $f'_2$  і  $f''_2$  першого та другого електричних сигналів  $u'_2(t)$  і  $u''_2(t)$  відповідно, після вимірювання та запам'ятовування значень цих частот подають третю калібровану за значенням напругу  $U_{03}$  на перший і другий нагрівальні елементи, перетворюють струм  $I'_3$  і  $I''_3$  через них у теплову потужність  $P'_3$  і  $P''_3$ , по закінченні заданого проміжку часу  $\Delta t$  перетворюють теплову потужність  $P'_3$  і  $P''_3$  у частоти  $f'_3$  і  $f''_3$  першого та другого електричних сигналів  $u'_3(t)$  і  $u''_3(t)$  відповідно, після вимірювання та запам'ятовування значень цих частот збільшують миттєві значення сумарного  $u_{\Sigma}(t)$  та різницевого  $u_{\Delta}(t)$  сигналів на значення напруги  $U_{02}$ , отримані сигнали  $u_{\Sigma 1}(t)$  і  $u_{\Delta 1}(t)$  подають на перший і другий резистивні нагрівальні елементи, перетворюють струми  $I'_4$  і  $I''_4$  через ці елементи у теплову потужність  $P'_4$  і  $P''_4$ , по закінченні заданого проміжку часу  $\Delta t$  перетворюють теплову потужність  $P'_4$  і  $P''_4$  у частоти  $f'_4$  і  $f''_4$  першого та другого електричних сигналів  $u'_4(t)$  і  $u''_4(t)$  відповідно, після вимірювання та запам'ятовування значень цих частот збільшують миттєві значення сумарного і різницевого сигналів  $u_{\Sigma}(t)$  і  $u_{\Delta}(t)$  на значення напруги  $U_{03}$ , отримані сигнали  $u_{\Sigma 2}(t)$  і  $u_{\Delta 2}(t)$  подають на перший і другий нагрівальні елементи, відповідно, перетворюють струми  $I'_5$  і  $I''_5$  через ці елементи у теплову потужність  $P'_5$  і  $P''_5$ , по закінченні заданого проміжку часу  $\Delta t$  перетворюють теплову потужність  $P'_5$  і  $P''_5$  у частоти  $f'_5$  і  $f''_5$  першого та другого електричних сигналів  $u'_5(t)$  і  $u''_5(t)$  відповідно, після вимірювання та запам'ятовування значень цих частот про дійсне значення електричної потужності судять по рівнянню надлишкових вимірювань

(13) A

(11) 55988

(19) UA

$$P_x = \frac{P_0 \left[ (f_5 - f_4) - \left( \frac{n_2 P_0 \Delta P (f_2^* + f_3^* - n_2 f_1^*) - (P_0^2 + \Delta P^2) (f_3 - f_2)}{P_0^2 - \Delta P^2} \right) \right]}{(f_3 - f_2) - \left( \frac{n_2 P_0 \Delta P (f_2^* + f_3^* - n_2 f_1^*) - (P_0^2 + \Delta P^2) (f_3 - f_2)}{P_0^2 - \Delta P^2} \right)} - \frac{P_0 \left[ (f_5 - f_4) - \left( \frac{n_2 P_0 \Delta P (f_2^* + f_3^* - n_2 f_1^*) - (P_0^2 + \Delta P^2) (f_3 - f_2)}{P_0^2 - \Delta P^2} \right) \right]}{(f_3 - f_2) - \left( \frac{n_2 P_0 \Delta P (f_2^* + f_3^* - n_2 f_1^*) - (P_0^2 + \Delta P^2) (f_3 - f_2)}{P_0^2 - \Delta P^2} \right)},$$

Винахід відноситься до області вимірювальної техніки і може бути застосований для вимірювання електричної потужності як синусоїдальних сигналів, так і сигналів складної форми.

Відомий спосіб перетворення потужності в частоту електричних сигналів (див. А с №337727 СССР, МКИ G 01 R 21/00 Компарирующий преобразователь электрической мощности в частоту следования импульсов (интервал времени) /Э А Кудряшов (СССР) -№1360182/18-10 Заявлено 04 09 1969, Опубл 05 05 1972, Бюл №15-2с), який полягає в додаванні та відніманні миттєвих значень вихідних сигналів датчиків току та напруги, перетворенні діючого значення одержаних сигналів в значення теплової потужності, а потім в значення частот двох електричних сигналів, виділенні сигналу різницевої частоти, по значенню якої судять про дійсне значення електричної потужності.

Наявність нелінійної складової функції перетворення сумарного та різницевого сигналів в частоту електричних сигналів обмежує точність вимірювання потужності. Температурна та часова нестабільність цієї ж функції перетворення зумовлює появу додаткових адитивної, мультиплікативної та нелінійної складових похибки вимірювання. В цілому це приводить до недостатньої точності вимірювання потужності відомим методом.

Відомий спосіб вимірювання електричної потужності (див. пат. 1721529 АІ СССР, МКИ G 01 R 21/06, 21/133 Спосіб измерения электрической мощности и устройство для его осуществления /В Н Чинков, В А Вернадский, А А Савицкий №4786971/21, Заявлено 30 01 90, Опубл. 23 03 92, Бюл. №11-4с), який полягає у вимірюванні току та напруги мережі, визначенні миттєвої потужності, нормуванні амплітуд електричних сигналів, перемноженні сигналів миттєвої потужності на кожний із двох ортогональних сигналів подвійної частоти мережі, возведенні до квадрату та інтегруванні сигналів добутку.

Відомий спосіб не забезпечує вимірювання потужності періодичних сигналів складної форми і має недостатню точність вимірювання. Це обумовлено високими похибками формування ортогональних гармонічних сигналів в широкому частотному діапазоні. Крім того, не лінійність та нестабільність функції перетворення добутку двох сигналів зумовлює появу адитивної, мультиплікативної та нелінійної складових похибок у результаті вимірювання потужності. Низька точність анало-

де  $P_0$  - калібрована за значенням електрична потужність,  $\Delta P$  - приріст електричної потужності, причому  $f_1, f_5, f_1', f_5'$  - частоти першого та другого електричних сигналів,  $n_2$  - коефіцієнт пропорційності ( $n_2=2$ )

гових методів возведення до квадрату миттєвих значень електричних сигналів також приводить до додаткових похибок вимірювань цим способом.

Відомий також спосіб визначення дійсного значення електричної потужності періодичних сигналів складної форми (див. Малов В В. Пьезорезонансные датчики -М Энергия, 1978 -с 121-124), який полягає в тому, що перетворюють напругу  $u_n(t)$  на навантаженні і струм  $i_n(t)$  через нього в перший та другий інформативні електричні сигнали, формують сумарний  $u_c(t)$  та різницевий  $u_d(t)$  сигнали шляхом додавання та віднімання інформативних електричних сигналів, подають сформовані електричні сигнали на перший і другий резистивні нагрівальні елементи з відомими і рівними між собою значеннями опорів  $R_{H1}$  і  $R_{H2}$ , перетворюють електричний струм  $I'$  і  $I''$  відповідно у теплову потужність  $P'$  і  $P''$  по закінченні заданого проміжку часу перетворюють теплову потужність  $P'$  і  $P''$  у частоти  $f'$  і  $f''$  першого та другого електричних сигналів, вимірюють їх, запам'ятовують та визначають дійсне значення електричної потужності за рівнянням вимірювань.

Відомому способу вимірювання електричної потужності притаманна низька точність вимірювання, яка обумовлена нелінійністю і нестабільністю функції перетворення термоелектричного перетворювача теплоти у частоту електричного сигналу. Це обмежує широке використання відомого способу у вимірювальній техніці. Нелінійна складової функції перетворення теплоти у частоту електричного сигналу приводить до появи нелінійної складової похибки у результаті вимірювання. Температурна та часова нестабільність нелінійної функції перетворення теплоти у частоту електричного сигналу обумовлює появу додаткових адитивної, мультиплікативної та нелінійної складових похибки. Крім того, вимірювачі, що реалізують відомий метод, чутливі до зміни термоелектричного перетворювача по результатах перевірки, по причині розбіжності характеристик перетворювачів.

В основу винаходу покладено створення такого способу визначення дійсного значення потужності, у якому введення нових операцій забезпечило б підвищення точності вимірювання при періодичних сигналах довільної форми.

Поставлена задача вирішується таким чином, що у способі визначення дійсного значення електричної потужності періодичних сигналів складної форми, який полягає в тому, що перетворюють

напругу  $u_n(t)$  на навантаженні і струм  $i_n(t)$  через нього в перший та другий інформативні електричні сигнали, формують сумарний  $u_{\Sigma}(t)$  та різницевий  $u_{\Delta}(t)$  сигнали шляхом додавання та віднімання інформативних електричних сигналів, подають сформовані електричні сигнали на перший і другий резистивні нагрівальні елементи з відомими і рівними між собою значеннями опорів  $R_{H1}$  і  $R_{H2}$ , перетворюють електричний струм  $I'$  і  $I''$  відповідно у теплову потужність  $P'$  і  $P''$ , по закінченні заданого проміжку часу перетворюють теплову потужність  $P'$  і  $P''$  у частоти  $f'$  і  $f''$  першого та другого електричних сигналів, вимірюють їх, запам'ятовують та визначають дійсне значення електричної потужності за рівнянням вимірювань, згідно з винаходом, формують першу, другу і третю стабілізовані та калібровані за значенням напруги  $U_{01}$ ,  $U_{02}$  і  $U_{03}$ , причому значення напруги  $U_{02}$  формують меншим за значення напруги  $U_{01}$  на калібровану за значенням величину  $\Delta U_0$ , а значення третьої напруги  $U_{03}$  формують більшим за значення напруги  $U_{01}$  на значення тієї ж величини  $\Delta U_0$ , обчислюють і запам'ятовують каліброване значення електричної потужності  $P_0 = \{P_0\} = \{U_{01}\}^2 / \{R_H\} = \{U_{01}\}^2 \{R_H\}$  при напрузі  $U_{01}$ , виділяють на першому і другому резистивних нагрівальних елементах теплову потужність  $P$  і  $P'$  при нульових значеннях струмів  $I_1$  і  $I'_1$  через них ( $\{I_1\} = \{I'_1\} = \{I\} = 0$ ), по закінченні заданого проміжку часу  $\Delta t$  перетворюють теплову потужність  $P_1$  і  $P'_1$  у частоти  $f_1$  і  $f'_1$  першого та другого електричних сигналів  $u_1(t)$  і  $u'_1(t)$  відповідно, після вимірювання та запам'ятовування значень цих частот подають другу калібровану за значенням напругу  $U_{02}$  на перший і другий нагрівальні елементи, перетворюють струми  $I_2$  і  $I'_2$  через них у теплову потужність  $P_2$  і  $P'_2$ , по закінченні заданого проміжку часу  $\Delta t$  перетворюють теплову потужність  $P_2$  і  $P'_2$  у частоти  $f_2$  і  $f'_2$  першого та другого електричних сигналів  $u_2(t)$  і  $u'_2(t)$  відповідно, після вимірювання та запам'ятовування значень цих частот подають третю калібровану за значенням напругу  $U_{03}$  на перший і другий нагрівальні елементи, перетворюють струм  $I_3$  і  $I'_3$  через них у теплову потужність  $P_3$  і  $P'_3$ , по закінченні заданого проміжку часу  $\Delta t$  перетворюють теплову потужність  $P_3$  і  $P'_3$  у частоти  $f_3$  і  $f'_3$  першого та другого електричних сигналів  $u_3(t)$  і  $u'_3(t)$  відповідно, після вимірювання та запам'ятовування значень цих частот збільшують миттєві значення сумарного  $u_{\Sigma}(t)$  та різницевого  $u_{\Delta}(t)$  сигналів на значення напруги  $U_{02}$ , отримані сигнали  $u_{\Sigma 1}(t)$  і  $u_{\Delta 1}(t)$  подають на перший і другий резистивні нагрівальні елементи, перетворюють струми  $I_4$  і  $I'_4$  через ці елементи у теплову потужність  $P_4$  і  $P'_4$  по закінченні заданого проміжку часу  $\Delta t$  перетворюють теплову потужність  $P_4$  і  $P'_4$  а у частоти  $f_4$  і  $f'_4$  першого та другого електричних сигналів  $u_4(t)$  і  $u'_4(t)$  відповідно, після вимірювання та запам'ятовування значень цих частот збільшують миттєві значення сумарного і різницевого сигналів  $u_{\Sigma}(t)$  і  $u_{\Delta}(t)$  на значення напруги  $U_{03}$ , отримані сигнали  $u_{\Sigma 2}(t)$  і  $u_{\Delta 2}(t)$  подають на перший і другий нагрівальні елементи, відповідно, перетворюють струми  $I_5$  і  $I'_5$  через ці елеме-

нти у теплову потужність  $P'_5$  і  $P''_5$ , по закінченні заданого проміжку часу  $\Delta t$  перетворюють теплову потужність  $P'_5$  і  $P''_5$  у частоти  $f'_5$  і  $f''_5$  першого та другого електричних сигналів  $u'_5(t)$  і  $u''_5(t)$  відповідно, після вимірювання та запам'ятовування значень цих частот про дійсне значення електричної потужності судять по рівнянню надлишкових вимірювань

$$P_x = \frac{P_0 \left[ (f'_5 - f'_4) - \left( \frac{n_2 P_0 \Delta P (f'_2 + f'_3 - n_2 f'_1) - (P_0^2 + \Delta P^2) (f'_3 - f'_2)}{P_0^2 - \Delta P^2} \right) \right]}{(f'_3 - f'_2) - \left( \frac{n_2 P_0 \Delta P (f'_2 + f'_3 - n_2 f'_1) - (P_0^2 + \Delta P^2) (f'_3 - f'_2)}{P_0^2 - \Delta P^2} \right)} - \frac{P_0 \left[ (f''_5 - f''_4) - \left( \frac{n_2 P_0 \Delta P (f''_2 + f''_3 - n_2 f''_1) - (P_0^2 + \Delta P^2) (f''_3 - f''_2)}{P_0^2 - \Delta P^2} \right) \right]}{(f''_3 - f''_2) - \left( \frac{n_2 P_0 \Delta P (f''_2 + f''_3 - n_2 f''_1) - (P_0^2 + \Delta P^2) (f''_3 - f''_2)}{P_0^2 - \Delta P^2} \right)},$$

де  $P_0$  - калібрована за значенням електрична потужність,  $\Delta P$  - приріст електричної потужності,  $f_1$   $f_5$ ,  $f'_1$   $f'_5$  - частоти першого та другого електричних сигналів,  $n_2$  - коефіцієнт пропорційності ( $n_2 = 2$ )

Виділення на першому і другому резистивних нагрівальних елементах теплової потужності при нульових значеннях струмів через них та перетворення їх через заданий проміжок часу у частоти  $f'_1$  і  $f_1$  електричних сигналів, забезпечило, разом з іншими суттєвими ознаками, виключення впливу адитивної складової похибки на результат вимірювання потужності

Формування каліброваних за значенням напруг  $U_{01}$ ,  $U_{02}$  та  $U_{03}$  і перетворення струмів від них у калібровану за значенням теплову потужність, а потім - у частоти, забезпечило, разом з іншими суттєвими ознаками, виключення нелінійної складової похибки з результату вимірювання за рахунок лінеаризації загальної функції перетворення та встановлення заданої чутливості цієї функції

Формування двох пар сумарних електричних сигналів ( $u_{\Sigma 1}(t)$  і  $u_{\Delta 1}(t)$ ,  $u_{\Sigma 2}(t)$  і  $u_{\Delta 2}(t)$ ) з використанням сумарного та різницевого сигналів і напруг  $U_{02}$  і  $U_{03}$  забезпечило, разом з іншими суттєвими ознаками, виключення як адитивних і мультиплікативних похибок результату вимірювання, так і нелінійну складову похибки. Крім того, проведення цих операцій дало можливість одержати дійсне значення електричної потужності періодичних сигналів довільної форми

Вивід та використання нового рівняння надлишкових вимірювань для обробки результатів проміжних вимірювань забезпечило виключення мультиплікативних (лінійної та нелінійної) складових похибки результату вимірювання при параболічній функції перетворення термоелектричного перетворювача сигналів, а значить, забезпечило підвищення точності вимірювання запропонованим способом

Використання нового рівняння надлишкових вимірювань та запропонованої послідовності та сукупності суттєвих ознак забезпечило нечутливість способу вимірювання електричної потужності до зміни чи розбіжностей параметрів нелінійної функції перетворення теплоти у частоту електричних сигналів при заміні одного термоелектричного

перетворювача іншим

В основу електротеплового методу вимірювання покладено зв'язок електричної потужності з тепловою потужністю та з температурою нагріву

Відомо, що електрична потужність  $P = R_n I^2 = U^2 / R_n$  ( $U$  і  $I$  – відповідно діючі значення напруги на навантаженні і струму через нього,  $R_n$  – опір резистивного нагрівального елемента термоелектричного перетворювача), що виділяється на резистивних нагрівальних елементах термоелектричного перетворювача, складається з теплової потужності  $\Phi$ , яка йде на підвищення внутрішньої температури перетворювача, та з потужності теплових утрат  $\Phi_y$  за рахунок теплопровідності, конвекції та тепловипромінювання

$$R = R_n I^2 = \Phi + \Phi_y = C \Delta T \Delta t + \Delta T / R_T \quad (1)$$

де  $C$  – теплоємність, постійна для даного термоелектричного перетворювача величина,  $\Delta t$  – заданий інтервал часу перетворення,  $R_T$  – тепловий опір,  $\Delta T$  – приріст температури при підведенні теплоти  $Q$ . Причому  $\{\Delta T\} = \{T_x\} - \{T_{окр}\}$ , де  $T_x$  – температура нагріву чутливого елемента термоелектричного перетворювача,  $T_{окр}$  – температура навколишнього середовища

При великих значеннях теплового опору  $R_T$  ( $\{R_T\} \rightarrow \infty$ ), тобто при ідеальній термоізоляції складових елементів термоелектричного перетворювача від навколишнього середовища, потужність теплових утрат  $\Phi_y$  дорівнює нулю. Тоді електрична потужність

$$P = \Phi = C \Delta T \Delta t = k_c \Delta T, \quad (2)$$

де  $k_c$  – коефіцієнт пропорційності ( $\{k_c\} = \{C\} \{\Delta t\}$ ), з одного боку буде дорівнювати тепловій потужності, а з другого – буде пропорційна приросту температури  $\Delta T$  чутливого елемента термоелектричного перетворювача при підведенні теплоти  $Q$  ( $Q = \Phi \Delta t$ ) за заданий проміжок часу  $\Delta t$

Таким чином, про електричну потужність можна судити як по тепловій потужності, так й по зміні температури нагріву чутливого елемента термоелектричного перетворювача. Якщо в якості чутливого елемента використовувати термочутливий п'єзореzonатор, то про електричну потужність можна судити по значенням частоти вихідного сигналу генератора з п'єзореzonатором

Описаний вище спосіб визначення дійсного значення потужності періодичних може бути реалізований за допомогою приладу, приведенного на фіг. 1. Блок-схема алгоритму програми виконання вимірювальних та інших операцій представлена на фіг. 2

Згідно із запропонованим способом, перетворюють напругу на навантаженні  $u_n(t)$  і струм  $i_n(t)$  через нього в перший та другий інформативні електричні сигнали

$$U_{c1}(t) = U_n(t) / n_1 \quad (3)$$

де  $n_1$  – коефіцієнт передачі (трансформації) сенсора напруги ( $n_1 = 200 \dots 250$ ),

$$u_{c2}(t) = i_n(t) / n_2 \quad (4)$$

де  $n_2$  – коефіцієнт трансформації сенсора струму ( $n_2 = 10 \dots 10^3$  в залежності від значення струму через навантаження),  $r$  – опір первинної обмотки сенсора струму

Формують сумарний  $u_{\Sigma}(t)$  та різницеви  $u_{\Delta}(t)$  сигнали шляхом додавання та віднімання інфор-

мативних електричних сигналів (3) і (4)

$$u_{\Delta}(t) = u_{c1}(t) - u_{c2}(t) \quad (5)$$

$$u_{\Sigma}(t) = u_{c1}(t) + u_{c2}(t) \quad (6)$$

При живленні навантаження, наприклад, синусоїдальною напругою, тобто при  $u_n(t) = U_m \sin \omega t$  і  $i_n(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi)$ , маємо

$$u_{\Delta}(t) = U_m \sin \omega t - I_m r n_2 \sin(\omega t + \varphi), \quad (7)$$

$$u_{\Sigma}(t) = U_m \sin \omega t + I_m r n_2 \sin(\omega t + \varphi), \quad (8)$$

Перетворюють електричний струм  $I$  і "відповідно у теплову потужність  $P$  і  $P'$  ( $P = k_c \Delta T$ , де  $\Delta T$  – приріст температури при підведенні теплоти  $Q$  за проміжок часу перетворення  $\Delta t$ ,  $k_c$  – коефіцієнт пропорційності), пропорційно якій змінюється на  $\Delta T$  і  $\Delta T'$  температура першого і другого чутливих елементів термоелектричного перетворювача за перебіг заданого проміжку часу перетворення  $\Delta t$ . Причому процес нагріву здійснюється при кінцевому, але достатньо великому значенні теплового опору  $R_T$  між термоелектричним перетворювачем і навколишнім середовищем

По закінченні заданого проміжку часу  $\Delta t$  перетворюють теплову потужність  $P$  і  $P'$  частоти  $f$  і  $f'$  першого та другого електричних сигналів

$$u'(t) = U'_m \sin k f t, \quad (9)$$

$$u''(t) = U''_m \sin k' f' t, \quad (10)$$

де  $U'_m$  і  $U''_m$  – амплітуди першого та другого електричних сигналів,  $k$  – коефіцієнт пропорційності ( $k = 2\pi$ )

Вимірюють їх, запам'ятовують та визначають дійсне значення електричної потужності за рівнянням вимірювання

У загальному випадку, при нелінійній (квадратичній) функції перетворення чутливого елемента (ЧЕ) термоелектричного перетворювача (ТПР), частоти  $f$  і  $f'$  першого та другого електричних сигналів (9) і (10) зв'язані з потужністю наступними рівняннями величин

$$f_{x1} = P_x^2 S_H' + P_x S_H' + f_0' \quad (11)$$

$$f_{x2} = P_x^2 S_H'' + P_x S_H'' + f_0'' \quad (12)$$

де  $S_H'$ ,  $S_H''$ ,  $S_H'$  і  $S_H''$  – параметри нелінійної функції перетворення генераторів з чутливими елементами термоелектричного перетворювача, причому  $\{S_H'\} = \{S_H\} (1 + \gamma'_H)$ ,  $\{S_H''\} = \{S_H\} (1 + \gamma''_H)$ ,  $\{S_H'\} = \{S_H\} (1 + \gamma'_H)$ ,  $\{S_H''\} = \{S_H\} (1 + \gamma''_H)$ , початкові частоти вихідних сигналів сенсорів,  $\gamma$  – відносні зміни параметрів нелінійної функції перетворення в результаті впливу зовнішніх дестабілізуючих факторів і старіння елементів термоелектричного перетворювача та генератора

Процес вимірювання починається з того, до перетворення електричного струму в потужність, формують першу, другу і третю стабілізовані та калібровані за значеннями напруги  $U_{01}$ ,  $U_{02}$  і  $U_{03}$ , причому значення напруги  $U_{02}$  формують меншим за значення напруги  $U_{01}$  на калібровану за значенням величину  $\Delta U_0$ , а значення третьої напруги  $U_{03}$  формують більшим за значення напруги  $U_{01}$  на значення тієї ж величини  $\Delta U_0$ , тобто

$$\{U_{02}\} = \{U_{01}\} - \{\Delta U_0\}, \quad (13)$$

$$\{U_{03}\}=\{U_{01}\}+\{\Delta U_{01}\} \quad (14)$$

Далі обчислюють і запам'ятовують каліброване значення потужності  $P_0(\{P_0\}=\{U_{01}\}^2/\{R_H\}=\{I_H\}^2\{R_H\})$  при напрузі  $U_{01}$

Виділяють на першому і другому резистивних нагрівальних елементах теплову потужність  $P_1'$  і  $P_1''$  при нульових значеннях струмів  $I_1'$  і  $I_1''$  через них, тобто  $\{I_1'\}=\{I_1''\}=\{I_1\}=0$

По закінченні заданого проміжку часу  $\Delta t$  перетворюють теплову потужність  $P_1'$  і  $P_1''$  у частоти  $f'$  і  $f''$ , першого та другого електричних сигналів  $u_1'(t)$  і  $u_1''(t)$  відповідно. В результаті одержують

$$u_1'(t)=U_{m1}\sin 2\pi f_1't \quad (15)$$

$$u_1''(t)=U_{m1}\sin 2\pi f_1''t \quad (16)$$

З урахуванням (11) і (12), частоти електричних сигналів (15) і (16) при нульових значеннях електричної потужності, тобто при  $\{P_1\}=0$ , можуть бути записані у вигляді рівнянь величин

$$f_1'=(P_1')^2S_H'+P_1S_H'+f_0' \quad (17)$$

$$f_1''=(P_1'')^2S_H''+P_1S_H''+f_0'' \quad (18)$$

Після вимірювання та запам'ятовування значень частот (17) і (18), подають другу калібровану за значенням напругу  $U_{02}$  (13) на перший і другий нагрівальні елементи термоелектричного перетворювача

Перетворюють струми  $I_2'$  і  $I_2''$  через них у теплову потужність  $P_2'$  і  $P_2''$ . При  $\{R_H\}=\{R_H\}$   $\{I_2'\}=\{I_2''\}=\{I_2\}$   $\{P_2'\}=\{P_2''\}=\{P_2\}$  і  $\{\Delta T_2'\}=\{\Delta T_2''\}=\{\Delta T_2\}$

При напрузі  $U_{02}$  (13) на першому та другому нагрівальних елементах значення електричної потужності  $P_2$ , тобто  $\{P_2\}=\{P_0\}-\{\Delta P\}$ , (19)

відрізняється від  $\{P_0\}$  на  $\{\Delta P\}$

По закінченні заданого проміжку часу  $\Delta t$  перетворюють теплову потужність  $P_2'$  і  $P_2''$  у частоти  $f_2'$  і  $f_2''$  першого та другого електричних сигналів

$$u_2'(t)=U_{m2}\sin 2\pi f_2't \quad (19)$$

$$u_2''(t)=U_{m2}\sin 2\pi f_2''t \quad (20)$$

відповідно

З урахуванням неідентичності функцій перетворення ЧЕ ТПР і рівнянь величин (11) і (12), рівняння зв'язку між величинами  $f_2'$  і  $P_2$  мають вигляд  $f_2'=(P_2')^2S_H'+P_2S_H'+f_0'$  (21)

$$f_2''=(P_2'')^2S_H''+P_2S_H''+f_0'' \quad (22)$$

Частоти (21) і (22) електричних сигналів (19) і (20) вимірюють і запам'ятовують

Після вимірювання та запам'ятовування значень частот (21) і (22) подають третю калібровану за значенням напругу  $U_{03}$  на перший і другий нагрівальні елементи

В результаті на нагрівальних елементах розсіюється потужність  $P_3$ , значення якої  $\{P_3\}=\{P_0\}+\{\Delta P\}$ , (23)

перевищує значення потужності  $P_0$  на  $\{\Delta P\}$

По закінченні заданого проміжку часу  $\Delta t$  перетворюють теплову потужність  $P_3$  у частоти  $f_3'$  і  $f_3''$  першого та другого електричних сигналів  $u_3'(t)=U_{m3}\sin 2\pi f_3't$  (24)

$$u_3''(t)=U_{m3}\sin 2\pi f_3''t \quad (25)$$

першого та другого електричних сигналів

$$u_3'(t)=U_{m3}\sin 2\pi f_3't \quad (26)$$

$$u_3''(t)=U_{m3}\sin 2\pi f_3''t \quad (27)$$

Частоти (24) і (25) електричних сигналів (26) і (27) вимірюють і запам'ятовують

Після вимірювання та запам'ятовування значень частот (24) і (25)

Збільшують миттєві значення сумарного  $u_{\Sigma}(t)$  (6) та різницевого  $u_{\Delta}(t)$  (5) сигналів на значення напруги  $U_{02}$  (13). В результаті діючі значення напруги на першому й другому нагрівальних елементах відповідно рівні

$$\{U_{\Sigma 1}\}=\{U_{\Sigma}\}+\{U_{02}\}, \quad (28)$$

$$\{U_{\Delta 1}\}=\{U_{\Delta}\}+\{U_{02}\}, \quad (29)$$

де  $\{U_{\Delta}\}$  - діюче значення напруги  $u_{\Delta}(t)$ ,  $\{U_{\Sigma}\}$  - діюче значення напруги  $u_{\Sigma}(t)$

Отримані сигнали  $u_{\Sigma 1}(t)$  (28) і  $u_{\Delta 1}(t)$  (29) подають, відповідно, на перший і другий резистивні нагрівальні елементи

Перетворюють струми  $I_4'$  і  $I_4''$  через ці елементи у теплову потужність  $P_4'$  і  $P_4''$ . Причому  $\{P_4'\}=\{P_2'\}+\{P_0'\}-\{P_{02}\}$ , (30)

$$\{P_4'\}=\{P_2'\}+\{P_0'\}-\{P_{02}\} \quad (31)$$

По закінченні заданого проміжку часу  $\Delta t$  перетворюють теплову потужність  $P_4'$  і  $P_4''$  у частоти  $f_4'$  і  $f_4''$  першого та другого електричних сигналів  $u_4'(t)=U_{m4}\sin 2\pi f_4't$  (32)

$$u_4''(t)=U_{m4}\sin 2\pi f_4''t \quad (33)$$

першого та другого електричних сигналів

$$u_4'(t)=U_{m4}\sin 2\pi f_4't \quad (34)$$

$$u_4''(t)=U_{m4}\sin 2\pi f_4''t \quad (35)$$

відповідно

Частоти (32) і (33) електричних сигналів (34) і (35) вимірюють і запам'ятовують

Після вимірювання та запам'ятовування значень цих частот збільшують миттєві значення сумарного і різницевого сигналів  $u_{\Sigma}(t)$  (6) і  $u_{\Delta}(t)$  (5) на значення напруги  $U_{03}$  (14)

В результаті діючі значення напруг на першому й іншому нагрівальних елементах відповідно дорівнюють  $\{U_{\Sigma 2}\}=\{U_{\Sigma}\}+\{U_{03}\}$ , (36)

$$\{U_{\Delta 2}\}=\{U_{\Delta}\}+\{U_{03}\}, \quad (37)$$

Отримані сигнали  $u_{\Sigma 2}(t)$  (36) і  $u_{\Delta 2}(t)$  (37) подають, відповідно, на перший і другий резистивні нагрівальні елементи

Перетворюють струми  $I_5'$  і  $I_5''$  через ці елементи у теплову потужність  $P_5'$  і  $P_5''$ . Причому  $\{P_5'\}=\{P_2'\}+\{P_0'\}+\{P_{02}\}$ , (38)

$$\{P_5'\}=\{P_2'\}+\{P_0'\}+\{P_{02}\} \quad (39)$$

По закінченні заданого проміжку часу  $\Delta t$  перетворюють теплову потужність  $P_5'$  і  $P_5''$  у частоти  $f_5'$  і  $f_5''$  першого та другого електричних сигналів  $u_5'(t)=U_{m5}\sin 2\pi f_5't$  (40)

$$u_5''(t)=U_{m5}\sin 2\pi f_5''t \quad (41)$$

першого та другого електричних сигналів

$$u_5'(t)=U_{m5}\sin 2\pi f_5't \quad (42)$$

$$u''_5(t) = U''_{m5} \sin 2\pi f_5 t \quad (43)$$

відповідно

Після вимірювання та запам'ятовування значень цих частот, про дійсне значення електричної потужності судять по рівнянню надлишкових вимірювань

$$P_x = \frac{P_0 \left[ (f_5 - f_4) - \left( \frac{n_2 P_0 \Delta P (f_2^2 + f_3^2 - n_2 f_1^2) - (P_0^2 + \Delta P^2) (f_3 - f_2)}{P_0^2 - \Delta P^2} \right) \right]}{(f_3 - f_2) - \left( \frac{n_2 P_0 \Delta P (f_2^2 + f_3^2 - n_2 f_1^2) - (P_0^2 + \Delta P^2) (f_3 - f_2)}{P_0^2 - \Delta P^2} \right)} - \frac{P_0 \left[ (f_5^* - f_4^*) - \left( \frac{n_2 P_0 \Delta P (f_2^{*2} + f_3^{*2} - n_2 f_1^{*2}) - (P_0^2 + \Delta P^2) (f_3^* - f_2^*)}{P_0^2 - \Delta P^2} \right) \right]}{(f_3^* - f_2^*) - \left( \frac{n_2 P_0 \Delta P (f_2^{*2} + f_3^{*2} - n_2 f_1^{*2}) - (P_0^2 + \Delta P^2) (f_3^* - f_2^*)}{P_0^2 - \Delta P^2} \right)}$$

де  $P_0$  - калібрована за значенням електрична потужність,  $\Delta P$  - приріст електричної потужності, причому  $\{ \Delta P \} = \{ \{ P_2 \} - \{ P_1 \} \}$ ,  $f_1, f_5, f_1^*, f_5^*$  - частоти першого та другого електричних сигналів,  $n_2$  - коефіцієнт пропорційності ( $n_2 = 2$ )

У приведеній структурній схемі вимірювання потужності (фіг 1) використані наступні позначення: 1 - навантаження (Z), 2 - датчик струму, 3 - датчик напруги, 4 - перший суматор, 5 - пристрій, що віднімає, 6 і 7 - перший та другий автоматичні перемикачі, 8 - джерело опорної напруги, 9 і 10 - другий та третій суматори, 11 - термоелектричний перетворювач, в склад якого входять перший та другий резистивні нагрівальні елементи (HE1 і HE2) та перший і другий чутливі елементи (ЧЕ1 і ЧЕ2), 12 і 13 - перший та другий генератори електричних сигналів, 14 - змішувач частот, 15 - фільтр низьких частот-формуваць імпульсів, 16 - вимірювач частоти, 17 - блок керування, 18 - арифметико-логічний пристрій, 19 - цифровий відліковий пристрій

Причому навантаження 1 і датчик напруги 3 з'єднані паралельно і через датчик струму 2 підключені до мережі періодичного сигналу довільної форми. Виходи датчиків струму 2 і напруги 3 підключені, відповідно, до перших та других входів першого суматора 4 і пристрою 5, що віднімає, які є першими елементами сумарного та різницевого каналів відповідно. Канал сумарного сигналу складають послідовно з'єднані перший суматор 4, перший автоматичний перемикач 6, другий суматор 9, перший резистивний нагрівальний елемент HE1 і перший чутливий елемент ЧЕ1 термоелектричного перетворювача 11, з'єднаний зі входом першого генератора 12 електричних сигналів

Канал різницевого сигналу складають послідовно з'єднані пристрій 5, що віднімає, другий автоматичний перемикач 7, третій суматор 10, другий резистивний нагрівальний елемент HE2 і другий чутливий елемент ЧЕ2 термоелектричного перетворювача 11, з'єднаний із другим генератором 13 електричних сигналів. Виходи генераторів 12 і 13 підключені, відповідно, до першого і другого входів змішувача частот 14, вихід якого підключено до послідовно з'єднаних між собою фільтра нижніх частот-формуваць імпульсів 15, вимірювача частоти 16, 18 - арифметико-логічного пристрою 18 і цифрового відлікового пристрою 19, вхід керування якого, як і входи керування арифметико-логічного пристрою 18 і вимірювача частоти

16 підключені, відповідно, до четвертого, п'ятого і шостого виходів блока керування 17, перший та другий виходи якого з'єднані з входами керування першого та другого автоматичних перемикачів 6 і 7 відповідно, а третій вихід підключений до входу керування джерела опорної напруги 8, чий вихід підключений до з'єднаних між собою других входів суматорів 9 і 10

У першому такті, автоматичні перемикачі 6 і 7 знаходяться у положенні, показаному на фіг 1, а джерело опорної напруги 8, завдяки подачі відповідної команди з блока керування 17, знаходиться у стані, при якому на його виході напруга відсутня. Згідно з блок-схемою алгоритму (див фіг 2), вимірюється нульове значення потужності, тобто при відсутності сигналів на входах суматорів 9 і 10, а значить і на нагрівальних елементах HE1 і HE2 ТПР 11

В другому (третьому) тактах вимірювання по команді з блока керування 17 на виході джерела опорної напруги 8 устанолюється напруга  $U_{02}(U_{03})$ , яка подається на другі входи суматорів 9 і 10. В результаті на нагрівальних елементах HE1 і HE2 ТПР виділяється відповідна теплова потужність. Це приводить до встановлення нових значень частот вихідних сигналів  $f_2$  і  $f_2^*$ , ( $f_3$  і  $f_3^*$ ) генераторів 12 і 13. У блоці 14 відбувається змішування частот електричних сигналів. За допомогою фільтра нижніх частот-формуваць імпульсів 15 виділяється сигнал різницевої частоти і формуються імпульси прямокутної форми. Ці імпульси поступають на вимірювач частоти 15, за допомогою якого і проводиться вимірювання різницевої частоти. В цілому другий (третій) такти вимірювання виконуються згідно з блок-схемою алгоритму (див фіг 2)

18

У четвертому (п'ятому) тактах вимірювання автоматичні перемикачі 6 і 7 замикаються. На перші входи суматорів 9 і 10 поступають, відповідно, сумарний і різницевий сигнали з виходів першого суматора 4 і пристрою 5, що віднімає. В другому і третьому суматорах 9 і 10 вони складаються з вихідним сигналом  $U_{02}(U_{03})$  джерела опорної напруги 8. В цей такт на нагрівальні елементи HE1 і HE2 ТПР 11 подаються сигнали  $U_{\Sigma 1}$  і  $U_{\Delta 1}$ , ( $U_{\Sigma 2}$  і  $U_{\Delta 2}$ ) відповідно. В результаті на нагрівальних елементах HE1 і HE2 ТПР 11 виділяється відповідна теплова потужність, що приводить до встановлення нових значень частот вихідних сигналів  $f_4$  і  $f_4^*$ , ( $f_5$  і  $f_5^*$ ) генераторів 12 і 13

В змішувачі частот 14 частоти  $f_4$  і  $f_4^*$ , ( $f_5$  і  $f_5^*$ ) електричних сигналів змішуються. За допомогою фільтра нижніх частот-формуваць імпульсів 15 виділяється сигнал різницевої частоти і формуються імпульси прямокутної форми. Ці імпульси поступають на вимірювач частоти 15, за допомогою якого і проводиться вимірювання різницевої частоти. В цілому четвертий і п'ятий такти вимірювання виконуються згідно з блок-схемою алгоритму (див фіг 2)

Одержані результати вимірювань обробляються згідно з рівнянням надлишкових вимірювань (44)

Таким чином, процес надлишкових вимірювань потужності періодичних сигналів складної

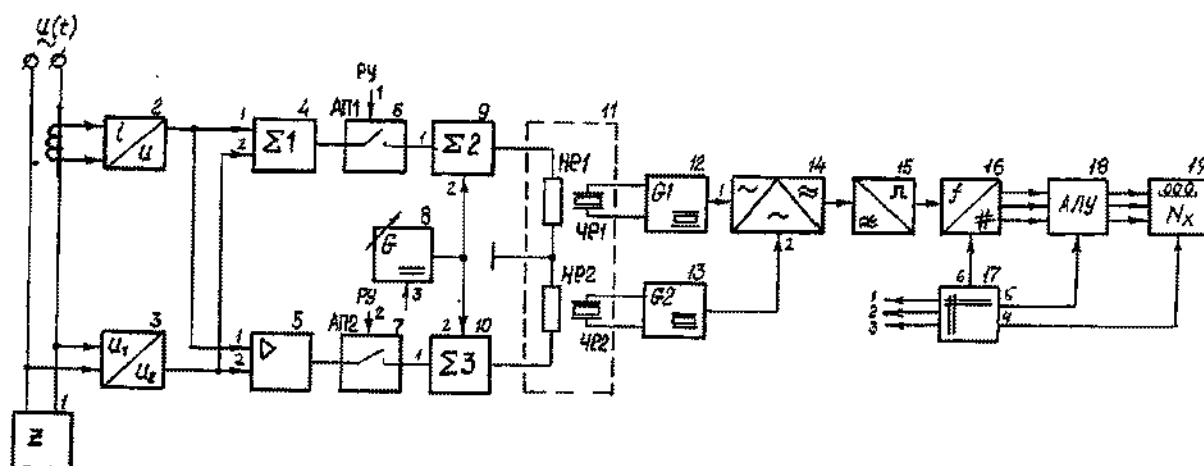
форми складається з п'яти тактів вимірювання частот електричних сигналів термоелектричного перетворювача потужності та одного такту обчислення отриманих результатів вимірювань

Запропонований спосіб забезпечує корекцію систематичних похибок, у тому числі і похибок від нелінійності і неідентичності функцій перетворення чутливих елементів термоелектричного перетворювача. Причому корекція зазначених похибок забезпечується за рахунок виконання запропонованої сукупності операцій і обробки результатів проміжних вимірювань частот електричних сигналів відповідно до отриманого нового рівняння надлишкових вимірювань. Для того, щоб переконатися у отриманні позитивного ефекту достатньо в (44) підставити аналітичні вирази для частот (17), (18), (21), (22), (24), (25), (32), (33) та привести подібні члени. В кінцевому виразі адитивна, мульти-

плікативна та нелінійна складові систематичної похибки, обумовлені нелінійністю та нестабільністю функції перетворення термоелектричного перетворювача будуть відсутні

У результаті розрахунку методичної похибки запропонованого способу вимірювання встановлено, що він забезпечує зменшення систематичної похибки вимірювання більш ніж на порядок і має постійне значення в межах всього діапазону вимірювання електричної потужності періодичних сигналів довільної форми

Запропонований електротепловий спосіб надлишкових вимірювань потужності електричних сигналів довільної форми доцільно використовувати в електротехніці та радіотехніці, де необхідна висока точність вимірювань електричної потужності та обліку електроенергії



Фиг. 1

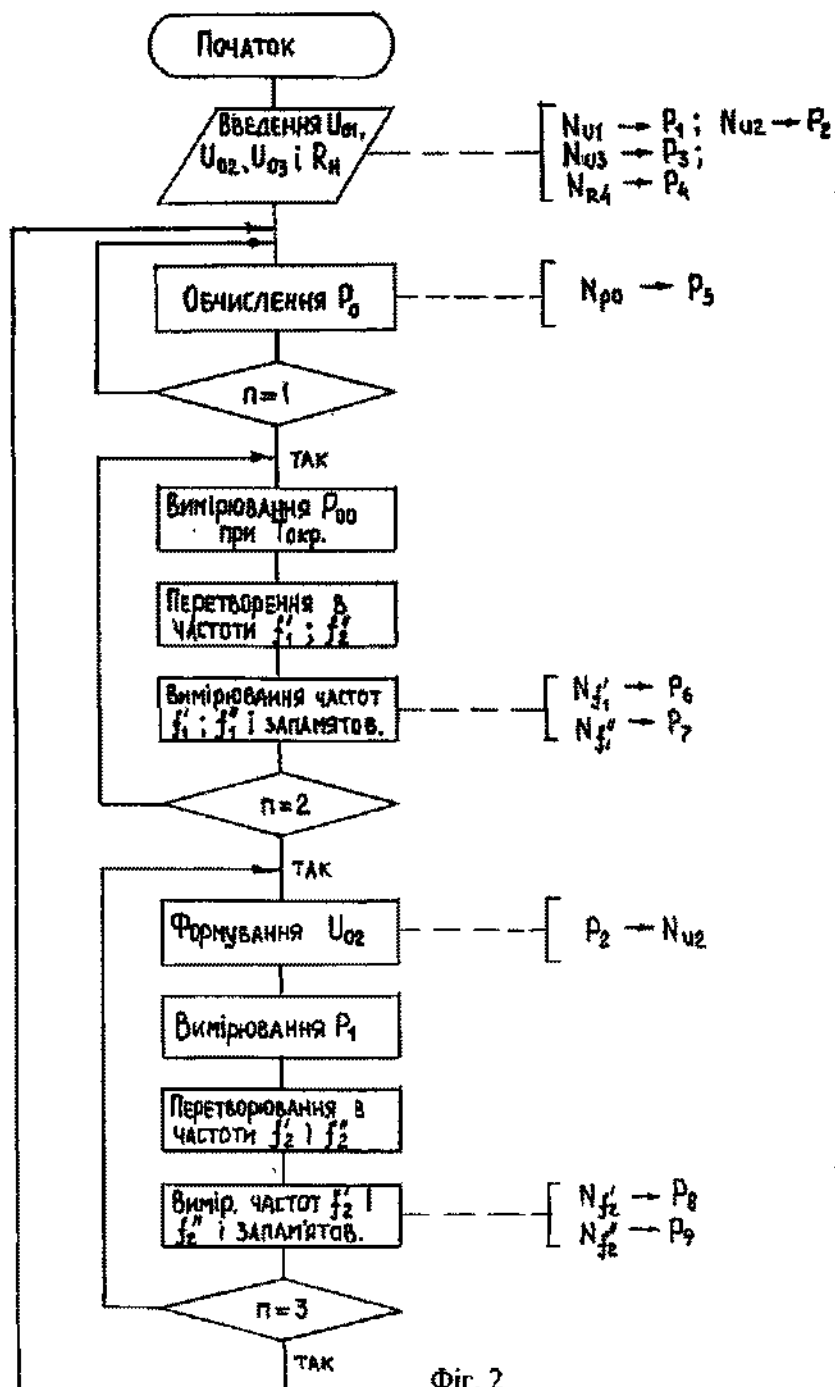


Fig. 2



