УДК 621.317

В.Ю. Кучерук, д.т.н.
П.І. Кулаков, к.т.н.
В.Ю. Марущак, к.т.н.
І.В. Коломійчук

ТАХОМЕТРИЧНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ З НИЗЬКОЧАСТОТНИМ ВИХІДНИМ СИГНАЛОМ

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, innakolomijchuk@i.ua

В цій статті дослідження направлені на розробку тахометричного перетворювача з низькочастотним вихідним сигналом. Розроблено креслення даного тахометричного перетворювача, його функціональну схему, часові діаграми роботи і математичну модель.

Постановка задачі

Існуючі фотоелектричні аналогові тахометричні перетворювачі (ТП), у яких вихідний сигнал прямо пропорційний куту повороту, мають певні недоліки: в максимумах та мінімумах вихідних імпульсів виникають їх значні викривлення внаслідок обмеженої смуги пропускання фотоприймачів, що входять до складу та неточності виготовлення модулятора і діафрагми; коефіцієнти пропорційності між крутизною заднього та переднього фронтів та кутовою швидкістю відрізняються між собою, що ускладнює алгоритм обробки сигналу; зміни знаку першої похідної ускладнює алгоритм визначення напрямку обертання [1], тому постає задача розробки ТП, який вільний від вказаних недоліків.

Аналіз стану досліджень та публікацій

Питанню тахометричних перетворювачів приділено багато уваги. ТП, що розглянуто у [7,9], має високу чутливість за кутом повороту, але частотні властивості його погані внаслідок високої частоти вихідного сигналу. Тому далі будемо розглядати використання ТП з низькочастотним вихідним сигналом чи ТП з низькочастотним вихідним сигналом та зменшенням похибки, що обумовлена неточністю виконання модулятору та діафрагми, які є більш високочастотними. Нижче пропонується частотний перетворювач, що дозволяє перетворювати крутизну вихідного сигналу ТП з низькочастотним вихідним сигналом у частоту слідування імпульсів з можливістю зміни розрізнювальною здатністю за кутом повороту у відповідності з контролюємою кутовою швидкістю.

Формування цілей статті

Метою статті є розробка нового ТП з низькочастотним вихідним сигналом та зменшенням похибки, що обумовлена частотними властивос-тями фотоприймачів та розробка його математичної моделі.

На рис.1 наведено креслення ТП, який включає в себе вал 1, який механічно спрягається з модулятором 2, в якому виконана прорізь 3 та прорізь 4. Прорізь 3 обмежена кривими $\rho_1(\varphi)$ та $\rho_2(\varphi)$, які описуються рівняннями (1) та (2).

$$\rho_1 = R_O, \qquad (1)$$

$$\rho_2(\varphi) = \sqrt{R_0^2 + a\varphi}. \qquad (2)$$

Форма прорізі 4 обмежена промінями, які починаються у центрі модулятору О, кут між

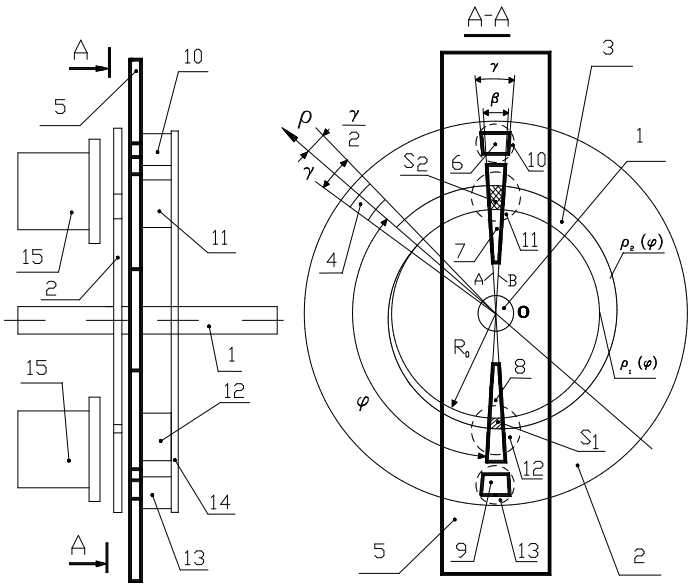

Рис. 1. ТП з низькочастотним вихідним сигналом та зменшенням похибки, що обумовлена частотними властивостями фотоприймачів

якими γ, та дугами концентричних кіл радіусами R_1 (більший радіус) та R_2, центр яких співпадає з центром модулятору. За модулятором знаходиться діафрагма 5 (її виділено жирною лінією), у якій виконано прорізі 6, 7, 8, 9. Форма прорізів 6 та 9 обмежена прямими, що починаються у центрі модулятора О, кут між якими γ, та дугами концентричних кіл радіусами R_1 (більший радіус) та R_2, центр яких співпадає з центром модулятору. Форма прорізів 7 та 8 обмежена прямими А та В, які схрещуються у центрі модулятору. Кут між ними дорівнює β. Усі прорізі діафрагми співвісні, їх вісь проходить через центр модулятору О. Прорізі 6 та 7 симетричні з прорізями 8 та 9 відносно прямої, що проходить через центр модулятору О та перпендикулярної їх загальної вісі. За діафрагмою, напроти прорізів 6, та 9 знаходяться фотоприймачі 10 та 13. Напроти прорізів 7 та 8 знаходяться фотоприймачі 11 та 12. Фотоприймачі та інші електронні компоненти знаходяться на платі 14. Фоточутливий шар фотоприймачів (позначено пунктирною лінією), через перехрестя прорізів модулятору та діафрагми, освітлюється джерелами світла 15, які забезпечують рівномірний світловий потік на усій освітлюємій поверхні [2]. Вихідна напруга фотоприймачів 11 та 12, які рознесені між собою на 180^0:

$$U_{\Phi} = IS_{I0}R_{33}S/r^2, \tag{3}$$

де S_{I0} - інтегральна струмова чутливість фотодіоду при немодульованому опроміненні;

r - відстань від джерела світла до поверхні, що освітлюється;

S - площа, що опромінюється;

I - сила світла.

прямо пропорційна площині отвору, через який світло попадає на фоточутливий шар фотодіоду, та відповідно визначається виразами :

$$U_{11} = \begin{cases} S_{I0}R_{33}\dfrac{I}{r^2}a\dfrac{\beta}{2}(\varphi+\pi) + S_{I0}R_{33}\dfrac{I}{r^2}a\dfrac{\beta^2}{4}, \varphi\in[0,2\pi-\beta); \\ -S_{I0}R_{33}\dfrac{I}{r^2}\dfrac{a(2\pi-\beta)}{2}(\varphi+\pi) + S_{I0}R_{33}\dfrac{I}{r^2}\dfrac{a(2\pi-\beta)^2}{4} + S_{I0}R_{33}\dfrac{I}{r^2}a\pi^2, \varphi\in[2\pi-\beta,2\pi); \end{cases} \tag{4}$$

$$U_{12} = \begin{cases} S_{I0}R_{33}\dfrac{I}{r^2}a\dfrac{\beta}{2}\varphi + S_{I0}R_{33}\dfrac{I}{r^2}a\dfrac{\beta^2}{4}, \varphi\in[0,2\pi-\beta); \\ -S_{I0}R_{33}\dfrac{I}{r^2}\dfrac{a(2\pi-\beta)}{2}\varphi + S_{I0}R_{33}\dfrac{I}{r^2}\dfrac{a(2\pi-\beta)^2}{4} + S_{I0}R_{33}\dfrac{I}{r^2}a\pi^2, \varphi\in[2\pi-\beta,2\pi). \end{cases} \tag{5}$$

Площа отвору, що утворюється при перекритті прорізів 6 та 9 діафрагми з проріззю 4 модулятора, змінюється за трикутним законом. Відповідно вихідна напруга операційних підсилювачів, що входять до складу фотоприймачів 13 та 10 змінюється за трикутним законом, та описується виразами:

$$U_{13} = \begin{cases} U_{F\ \mathrm{M}}(\varphi-2\pi+3\gamma/2)/\beta, \varphi\in(2\pi-\gamma-\beta/2, 2\pi-\beta/2]; \\ U_{F\ \mathrm{M}}(-\varphi+2\pi+\gamma/2)/\beta, \varphi\in(2\pi-\beta/2, 2\pi+\gamma-\beta/2]; \end{cases} \tag{6}$$

$$U_{10} = \begin{cases} U_{F\ \mathrm{M}}(\varphi-\pi+3\gamma/2)/\beta, \varphi\in(2\pi-\gamma-\beta/2, 2\pi-\beta/2]; \\ U_{F\ \mathrm{M}}(-\varphi+3\pi+\gamma/2)/\beta, \varphi\in(2\pi-\beta/2, 2\pi+\gamma-\beta/2], \end{cases}, \tag{7}$$

де $U_{F\ \mathrm{M}}$ - максимальна вихідна напруга операційних підсилювачів, що входять до складу фотоприймачів 10 та 13.

$$U_{F\ \mathrm{M}} = S_{I0}R_{33}\frac{I}{r^2}\cdot\frac{\gamma}{2}\left(R_1^2 - R_2^2\right). \tag{8}$$

Завдяки геометричному розташуванню прорізів, трикутні імпульси напруги формуються в ті моменти часу, коли вихідна напруга фотоприймачів 11 та 12 знаходиться біля свого мінімуму чи максимуму. Вони порівнюються з напругою $U_П$, моменти співпадання з якою визначають тривалість вихідних імпульсів фотоприймачів 10 та 13 і відповідно коломінімумну та коломаксимумну області вихідної напруги фотоприймачів 11 та 12. Розглянемо функціональну схему розробленого ТП, яку наведено на рис. 2, та часові діаграми його роботи, які наведено на рис. 3.

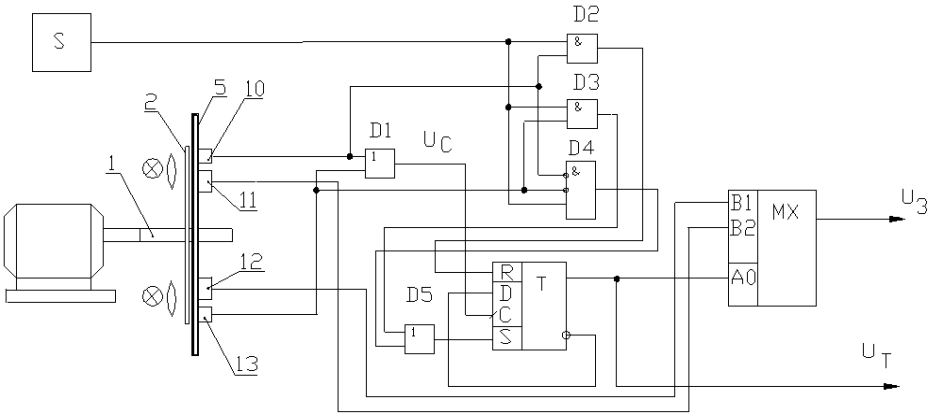

Рис. 2. Функціональна схема ТП з низькочастотним вихідним сигналом та зменшенням похибки, що обумовлена частотними властивостями фотоприймачів

Перед початком вимірювань модулятор випадково розташовує-ться відносно діафрагми, тому необхідно підклю-чити до виходу ТП вихідний сигнал того з фотоприймачів, який не знаходиться біля свого мінімуму чи максимуму, чи для якого початковий кут повороту модулятора відносно діафрагми не відповідає задньому фро-нту вихідної напруги, при

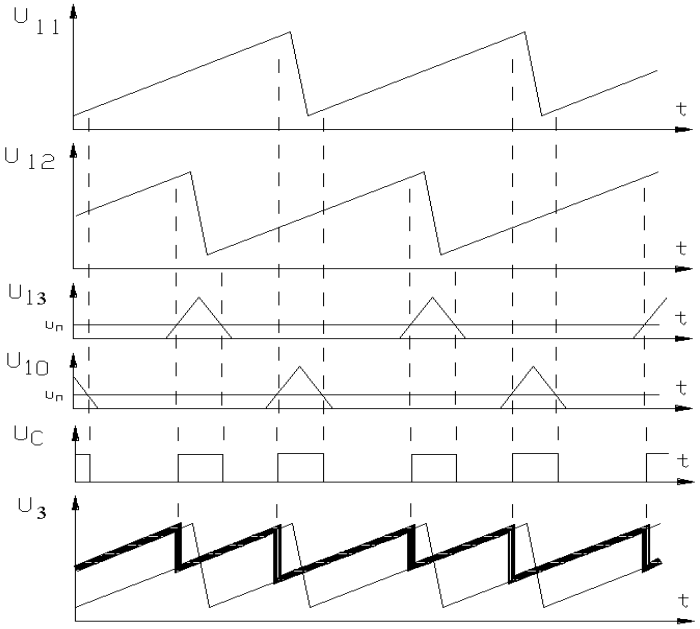

Рис. 3. Часові діаграми роботи ТП з низькочастотним вихідним сигналом та зменшенням похибки, що обумовлена частотними властивостями фотоприймачів

обертанні за часовою стрілкою у відповідності з рис. 1. Можливі наступні стани вихідної напруги фотоприймачів 10 та 13, які відповідають початковому розташу-ванню модулятора від-носно діафрагми: вихід-ний сигнал жодного з фотоприймачів 11 чи 12 не знаходиться у своїй коломаксимумній чи коломінімумній області та кут повороту не відповідає задньому фронту (вихідні напруги фотоприймачів 10 та 13 низького рівня), або навпаки (вихідна напруга одного з фотоприймачів 10 чи 13 високого рівня); У першому випадку, до виходу ТП підключається вихідний сигнал фотоприймача 12, що забезпечується за допомогою логічного елементу D4 трьох входового І з двома інверсними входами та елементу АБО D5. Вихідні напруги фотоприймачів 10 та 13 подаються на інверсні входи елементу D4. Перед початком вимірювання формувач сигналу запуску S формує одиничний імпульс рівня логічної одиниці, який подається третій неінверсний вхід. Якщо вихідна напруга обох фотоприймачів 10 та 13 низького рівня, під час дії імпульсу запуску на виході елементу D4 з'являється високий рівень напруги, який через логічний елемент АБО D5 скидає тригер Т, який керує мультиплексором МХ. При наявності низького рівня на його вході АО, до виходу ТП підключається вихідний сигнал фотоприймача 12. У другому випадку відбувається аналіз стану вихідних напруг

фотоприймачів 10 та 13, і до виходу ТП підключається той фотоприймач, вихідний сигнал якого не знаходиться у своїй коломаксимумній чи коломінімумній області. Здійснюється це за допомогою логічних елементів I D2, D3. Перед початком вимірювання, одиничний імпульс рівня логічної одиниці, що формується формувачем сигналу запуску S, подається на входи логічних елементів I D2, D3, D4, на інші входи яких подається вихідна напруга фотоприймачів 10 (на D2) та 13 (на D1). При наявності високого рівня на виході фотоприймача, на виході відповідного логічного елементу під час дії імпульсу запуску також з'являється високий рівень, який може встановити в одиницю чи скинути тригер Т, який керує мультіплексором МХ. Таким чином, перед початком вимірювання, при наявності напруги високого рівня на виході фотоприймача 13 під час дії сигналу запуску, до виходу ТП підключається вихідний сигнал фотоприймача 11, у випадку, коли на виході фотоприймача 10 присутній високий рівень напруги, до виходу ТП підключається вихідний сигнал фотоприймача 12. Коли сигнал на виході формувача сигналу запуску S стає низького рівня, низький рівень з'являється на виходах логічних елементів D2, D3, D4, і він ніяк не впливає на стан лічильного тригеру Т, який керує аналоговим мультиплексором. При обертанні модулятора на виході фотоприймачів 11 та 12 формуються пилкоподібні імпульси напруги, фазовий зсув між якими 180^0. У той проміжок часу, коли вихідна напруга цих фотоприймачів знаходиться у своїй коломаксимумній чи коломінімумній області, на виході фотоприймачів 10 чи 13 формуються імпульси, тривалість якого дорівнює часу знаходження вихідної напруги фотоприймачів 11 та 12 у цій області. Через логічний елемент АБО D1 вони поступають на тактовий вхід лічильного тригера Т, який за переднім фронтом кожного імпульсу змінює свій стан на протилежний, і таким чином, керуючи аналоговим мультіплексором, послідовно підключає до виходи ТП вихідний сигнал того фотоприймача 11 чи 12, вихідний сигнал якого не знаходиться у своїх коломаксимумній чи коломінімумній області. Переключення вихідних сигналів фотоприймачів відбувається у ті моменти часу коли модулятор повертається відносно діафрагми на кути $\varphi_{П1}$, $\varphi_{П2}$, які визначаються виразами

$$\varphi_{П1} = U_П \beta / U_{F\ M} + 2\pi - 3\gamma/2; \tag{9}$$

$$\varphi_{П2} = U_П \beta / U_{F\ M} + \pi - 3\gamma/2. \tag{10}$$

Рівняння перетворення, яке зв'язує вхідну та вихідну величини у статичному режимі, описується виразом

$$U_3(t) = \begin{bmatrix} S_{I0} R_{33} \dfrac{I}{r^2}\left(a\dfrac{\beta}{2}\omega t + a\dfrac{\beta^2}{4}\right), \varphi \in [\varphi_{П1}, \varphi_{П2}); \\ S_{I0} R_{33} \dfrac{I}{r^2}\left(a\dfrac{\beta}{2}(\omega t + \pi) + a\dfrac{\beta^2}{4}\right), \varphi \in [\varphi_{П2}, \varphi_{П1}). \end{bmatrix}. \tag{11}$$

Для динамічного режиму вираз (11) приймає вигляд

$$U_3(t) = \begin{bmatrix} S_{I0} R_{33} \dfrac{I}{r^2}\left(a\dfrac{\beta}{2}\int \omega(t)dt + a\dfrac{\beta^2}{4}\right), \varphi \in [\varphi_{П1}, \varphi_{П2}); \\ S_{I0} R_{33} \dfrac{I}{r^2}\left(a\dfrac{\beta}{2}(\pi + \int \omega(t)dt) + a\dfrac{\beta^2}{4}\right), \varphi \in [\varphi_{П2}, \varphi_{П1}). \end{bmatrix} \tag{12}$$

Вираз, що зв'язує вихідну напругу ТП та миттєву кутову швидкість

$$\omega(t) = \frac{2r^2}{S_{I0} R_{33} a I \beta} \frac{dU_3(t)}{dt}. \tag{13}$$

Рівняння, що зв'язує вихідну напругу ТП з кутом повороту φ

$$\varphi(t) = \begin{bmatrix} \dfrac{2r^2}{S_{I0} R_{33} I a \beta} U_3(t) - \dfrac{\beta}{2}, \quad \text{при} \quad U_T = 0; \\ \dfrac{2r^2}{S_{I0} R_{33} I a \beta} U_3(t) - \dfrac{\beta}{2} - \pi, \quad \text{при} \quad U_T = 1. \end{bmatrix} \tag{14}$$

де U_T - рівень напруги на виході лічильного тригеру. U_T=0, коли до виходу ТП підключено вихідний сигнал фотоприймача 12 та U_T=1, коли до виходу ТП підключено вихідний сигнал фотоприймача 11. Напрямок обертання визначається шляхом визначення знаку першої похідної вихідного сигналу ТП. Коли похідна більша нулю, обертання відбувається за часовою стрілкою (у відповідності з рис. 1), та навпаки.

Для створення математичної моделі ТП при роботі об'єкту контролю у динамічному режимі знайдемо спектральні щільності вихідних напруг фотоприймачів 11 та 12. Спектральна щільність залежності від часу площини фоточутливого шару фотоприймача 12 описується виразом:

$$\dot{S}_{12}(\Omega)=\begin{bmatrix}\int_{t_1}^{t_2}\left(a\beta\varphi(t)/2+a\beta^2/4\right)\exp(-j\Omega t)dt,\varphi\in[n,2\pi(n+1)-\beta),\ \mathrm{n}=0,1,2,3...;\\ \int_{t_1}^{t_2}\left(-a(2\pi-\beta)\varphi(t)/2+a(2\pi-\beta)^2/4+a\pi^2\right)\exp(-j\Omega t)dt,\varphi\in[2\pi(n+1)-\beta,2\pi(n+1))\end{bmatrix} \quad (15)$$

фотоприймача 11 :

$$\dot{S}_{11}(\Omega)=\begin{bmatrix}\int_{t_1}^{t_2}\left(a\beta(\varphi(t)+\pi)/2+a\beta^2/4\right)\exp(-j\Omega t)dt,\varphi\in[n,2\pi(n+1)-\beta), \qquad \mathrm{n}=0,1,2,3...;\\ \int_{t_1}^{t_2}\left(-a(2\pi-\beta)(\varphi(t)+\pi)/2+a(2\pi-\beta)^2/4+a\pi^2\right)\exp(-j\Omega t)dt,\varphi\in[2\pi(n+1)-\beta,2\pi(n+1)).\end{bmatrix} \quad (16)$$

Спектральні щільності вихідних напруг цих фотоприймачів

$$\dot{U}_{12}(\Omega)=\dot{K}_S(\Omega)\dot{S}_{12}(\Omega)\left(1-I_S e_e\dot{Z}_{EH}(\Omega)/K_0R_{BX}R_{33}kT\left(I_S\, e_e\dot{Z}_{EH}(\Omega)/kT-1\right)\right)+ \\ +\Delta I\cdot R_{33}+U_{3M}+\dot{U}_{Ш}; \quad (17)$$

$$\dot{U}_{11}(\Omega)=\dot{K}_S(\Omega)\dot{S}_{11}(\Omega)\left(1-I_S\, e_e\dot{Z}_{EH}(\Omega)/K_0R_{BX}R_{33}kT\left(I_S e_e\dot{Z}_{EH}(\Omega)/kT-1\right)\right)+ \\ +\Delta I\cdot R_{33}+U_{3M}+\dot{U}_{Ш}. \quad (18)$$

Спектральна щільність вихідної напруги описується виразом

$$\dot{U}_3(\Omega)=\begin{bmatrix}\dot{U}_{11}(\Omega),\varphi\in[\varphi_{П1},\varphi_{П2});\\ \dot{U}_{12}(\Omega),\varphi\in[\varphi_{П2},\varphi_{П1}).\end{bmatrix} \quad (19)$$

Перехід до залежності вихідної напруги від часу здійснюється шляхом зворотного перетворення Фур'є. Вирази (15)-(19) описують математичну модель розробленого ТП у динамічному режимі роботи об'єкту контролю. Для створення математичної моделі ТП, для усталеного режиму об'єкту контролю, розкладемо залежності площі фоточутливого шару фотоприймачів 11 та 12 що освітлюється у ряд Фур'є.

$$\dot{S}_{11}(t)=\frac{S_0}{2}+\sum_{n=1}^{\infty}(S_{Am}\cos(n\Omega t)+jS_{Bm}\sin(n\Omega t)); \quad (20)$$

$$\dot{S}_{12}(t)=\frac{S_0}{2}+\sum_{n=1}^{\infty}(S_{Am}\cos(n\Omega t+\pi)+jS_{Bm}\sin(n\Omega t+\pi)). \quad (21)$$

Підставивши вирази (20) та (21) у

$$\dot{U}_{Ф}=\dot{K}_S(\Omega)\dot{S}\left(1-I_S e_e\dot{Z}_{EH}\Big/K_0R_{BX}R_{33}kT\left(I_S\frac{e_e}{kT}\dot{Z}_{EH}-1\right)\right)+\Delta I\cdot R_{33}+U_{3M}+\dot{U}_{Ш}. \quad (22)$$

отримуємо вирази для комплексних вихідних напруг фотоприймачів 11 та 12.

$$\dot{U}_{11}(t) = U_0\left(\frac{S_0}{2}\right) + \Delta I \cdot R_{33} + U_{3M} + \dot{U}_{Ш} + \sum_{m=1}^{\infty} \dot{K}_S\,(m\,\Omega)\,(\,S_{Am}\cos(m\,\Omega\,t) +$$
$$+\,jS_{Bm} si\,n\,(m\,\Omega\,t))\cdot\left(1 - I_S\,e_e\,\dot{Z}_{EH}\,(\,m\,\Omega\,)\Big/ K_0\,R_{BX}\,R_{33}\,k\,T\left(\frac{I_S e_e\,\dot{Z}_{EH}(\,m\,\Omega\,)}{kT} - 1\right)\right); \quad (23)$$

$$\dot{U}_{12}(t) = U_0\left(\frac{S_0}{2}\right) + \Delta I \cdot R_{33} + U_{3M} + \dot{U}_{Ш} + \sum_{m=1}^{\infty} \dot{K}_S(m\Omega)(S_{Am}\cos(m\Omega t + \pi) +$$
$$+\,jS_{Bm}\sin(m\Omega t + \pi))\cdot\left(1 - I_S e_e \dot{Z}_{EH}(m\Omega)\Big/ K_0 R_{BX} R_{33} kT\left(\frac{I_S e_e \dot{Z}_{EH}(m\Omega)}{kT} - 1\right)\right). \quad (24)$$

Вираз для вихідної напруги ТП має вигляд

$$\dot{U}_3(\Omega) = \left[\begin{array}{l} \dot{U}_{11}(\Omega, t), \varphi \in [\varphi_{П1}, \varphi_{П2}); \\ \dot{U}_{12}(\Omega, t), \varphi \in [\varphi_{П2}, \varphi_{П1}). \end{array}\right. \quad (25)$$

Вирази (20) - (25) є математичною моделлю ТП при роботі об’єкту контролю в усталеному режимі. Розроблений ТП з низькочастотним вихідним сигналом та зменшенням похибки первинного перетворення, що обумовлена неточністю виконання модулятора та діафрагми придатний високоточного контролю параметрів високооборотних об’єктів.

Висновки

В статті було наведено розробку нового ТП з низькочастотним вихідним сигналом та зменшенням похибки**,** що обумовлена частотними властивостями фотоприймачів та розроблено його математичну модель. За рахунок зменшення частоти вихідного сигналу ТП, розширюється діапазон вимірювального контролю кутової швидкості.

Список літературних джерел

1. Патент №24374. Україна, A G01P 3/44. Датчик угловой скорости для динамических измерений / Поджаренко В.А., Михалевич В.М., Кулаков П.І., та інш. (Україна). – Реєстраційний номер заявки 97041547; Вих. № 4940 від 18.02.1998.

2. Баскаков С.И., Радиотехнические цепи и сигналы: Учеб. для вузов по спец. “Радиотехника”. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1988. – 448 с.

3. М.Д. Аксененко, М.Л. Бараночников, О.В. Смолин Микроэлектронные фотоприемные устройства. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 208 с.

4. Тахометры и торсиометры: Пер. с яп. № КМ-79763. – К.: КР ВЦП, 1986. – 43 с.

5. Поджаренко В.О., Кулаков П.І., Поджаренко А.В. Цифровий тахометричний перетворювач із змінною розрізнювальною здатністю // Вимірювальна техніка та метрологія-1998.-№.53.-С.84-90.

6. Поджаренко В.О., Кулаков П.І., Поджаренко А.В., Шаргородський С.А., Почверук Є.В. Пристрій для вимірювання і контролю кутової швидкості та кута повороту // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах - 1998. - №2. - С. 45-50.

7. Кулаков П.И., Поджаренко В.А. Датчик угловой скорости и углового ускорения // Proceeding of the second international scientific and technical conference “Unconventional electromechanical and electrotechnical systems”. - Schecin, Poland. - 1996. - V. 2. - P. 489-494.

8. Патент №22701А. Україна, G01P3/44. Аналоговый датчик угловой скорости.. / Поджаренко В.А., Михалевич В.М., Кулаков П.І., Кухарчук В.В., Кучерук В.Ю., Поджаренко А.В. (Україна). - 10 с. ил.: Опубл. 30.06.98., Бюл. №3

9. Патент №17753 Україна, G01P3/44. Датчик кутової швидкості. / Кулаков П.І., Поджаренко В.А., Гоменюк А.С., Кухарчук В.В., Поджаренко А.В. (Україна) . - 14 с. ил.: Опубл. 31.10.97, Бюл. №5.

10. Кулаков П.І., Поджаренко А.В. Інтелектуалізований сенсор кутової швидкості. // Материалы международного симпозиума “Наука и предпринимательство”. - Винница-Львов. - 1996. - С. 175.