

ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ТА КОНТРОЛЮ КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ ТА КУТА ПОВОРОТУ

Поджаренко Володимир Олександрович, Кулаков Павло Ігорович,
Поджаренко Андрій Володимирович, Шаргородський
Сергій Анатолійович, Почверук Євген Васильович

Вінницький державний технічний університет

Вступ

Кутову швидкість та кутове положення валу багатьох електродвигунів, які працюють у різноманітних пристроях автоматики, системах точних електроприводів, побутових пристроях, необхідно вимірювати та контролювати на протязі часу їх роботи. В теперішній час для цього найчастіше використовують тахометри на основі частотних тахометричних перетворювачів (ТП), принцип дії яких полягає у апаратному диференціюванні кута повороту за часом. В процесі їх роботи визначається відношення

$$\omega = \frac{\alpha_0}{t_B}, \quad (1)$$

де α_0, t_B – відповідно кут та час повороту первинного ТП, який встановлено на валу приводу, що досліджується; ω - середнє за час t_B значення кутової швидкості.

Для частотних ТП $\alpha_0 = \text{const}$, тобто диференціювання здійснюється із змінним часовим приростом, що є їх основним недоліком. Це приводить до того, що при обертанні з кутовим прискоренням та при малих кутових швидкостях похибка первинного перетворення може значно збільшитись [1].

Слід зазначити, що визначення напрямку обертання та кутового положення валу об'єкту досліджень перед його запуском (що необхідно наприклад при дослідженні синхронних електродвигунів) при використанні частотного ТП вимагає введення додаткового пристрою.

У роботі описується ТП, рівень вихідного сигналу якого лінійно залежить від кута повороту, що дає можливість однозначного визначення кутового положення валу об'єкту досліджень в будь-який момент часу. Кутова швидкість визначається як величина прямо пропорційна першій похідній вихідного сигналу ТП, а напрямок обертання визначається шляхом знаходження знаку похідної. Розглянуто також структурну схему комп'ютерного пристрою, у якому програмно здійснюється обчислення кутової швидкості та кутового положення, а миттєві значення вихідного сигналу ТП перетворюються у цифровий код за допомогою АЦП, який запускається через рівні проміжки часу, тобто диференціювання здійснюється з постійним часовим приростом.

Конструкція та принцип дії ТП

Розглянемо рис. 1, на якому наведено схематичне креслення ТП. Він має вал 1, на який насаджено модулятор 2, з діафрагмою 3. За діафрагмою знаходяться два фотоприймача 4 та 5 (на рис. 1, а вони також позначені відповідно F2 та F1. На рис. 1, б їх позначено штриховою лінією). Діафрагма (на рис. 1, б її позначено жирною лінією) має прорізи 6 та 7. Їх форма обмежена концентричними колами, центр яких співпадає з центром модулятора та промінями, які починаються в центрі модулятора, кут між якими дорівнює β . Модулятор має дві прорізи - 8 та 9. Прорізь 8 має таку ж форму і розташована на такій же відстані від центру модулятора, як і прорізь 7 діафрагми. Форма прорізі 9 обмежена кривими $\rho_1(\varphi)$ та $\rho_2(\varphi)$, вирази для яких у полярних координатах відносно вісі ρ , з полюсом, який співпадає з центром модулятора :

$$\rho_1(\varphi) = R_0 \quad (2)$$

$$\rho_2(\varphi) = \sqrt{R_0^2 + a\varphi}, \quad (3)$$

де a - постійний коефіцієнт, який визначає геометричні розміри прорізи; φ - кут повороту модулятора відносно діафрагми (див. рис. 1, б); R_0 - радіус кола $\rho_1(\varphi)$.

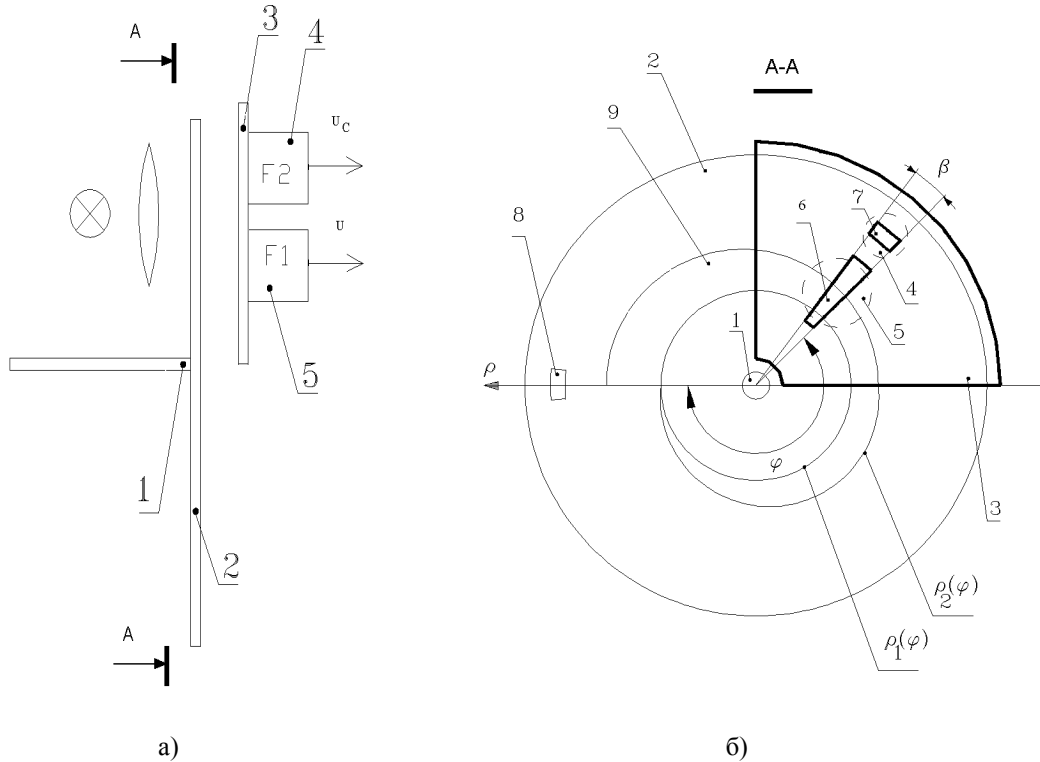


Рис. 1. Схематичне креслення ТП

Фотоприймач F1 (рис.2) реалізовано на основі пари фотодіод-операційний підсилювач [2]. Вихідна напруга такого фотоприймача в залежності від площі шару фотодіоду, що освітлюється, при освітленні джерелом світла з конденсорною лінзою, що забезпечує рівномірний світловий потік на всій освітлюємі поверхні, описується виразом [3]

$$U = \frac{I S_1 S R}{l^2 \sqrt{1 + (2 \pi f \tau_{VD})^2}} - I_S R \left(e^{\frac{e U_{VD}}{k T}} - 1 \right) + \Delta E_0, \quad (4)$$

де S - площа, що облучається; S_1 - інтегральна струмова чутливість фотодіоду, I_S - темновий струм фотодіоду, U_{VD} - падіння напруги на фотодіоді, T - абсолютна температура, k - постійна Больцмана, e - заряд електрону, U - вихідна напруга лінійного фотоприймача, ΔE_0 - вхідна ЕДС зміщення нуля операційного підсилювача, R - опір резистору у колі зворотнього зв'язку, τ_{VD} - постійна часу фотодіоду; l - відстань від джерела світла до освітлюємі поверхні; I - сила світла; f - частота облучення.

Другий член виразу (4) набагато менший першого, тому як за рахунок від'ємного зворотнього зв'язку, напруга U_{VD} на фотодіоді близька до нуля. Значення ΔE_0 мале у порівнянні з першим членом виразу (4). Це дає можливість знехтувати другим та третім членами. У випадку, коли частота потоку облучення значно менше граничної частоти фотодіоду, вираз (4) приймає вигляд

$$U = S_1 R \frac{I}{l^2} S, \quad (4)$$

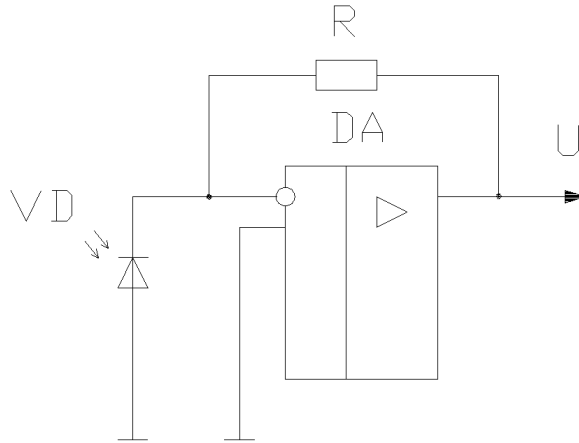


Рис. 2. Функціональна схема фотоприймача F1

Розглянемо, як залежить площа отвору, який утворюється при обертанні модулятора перекриттям прорізів 6 та 9 діафрагми та модулятора, через який світло попадає на фоточутливий шар фотодіоду фотоприймача F1, в залежності від кута повороту φ .

В діапазоні значень кута повороту $\varphi \in [0, 2\pi - \beta)$ ця залежність описується :

$$S(\varphi) = \frac{1}{2} \int_{\varphi}^{\varphi+\beta} (\rho_2^2(\varphi) - R_0^2) d\varphi = a \frac{\beta}{2} \varphi + a \frac{\beta^2}{4} \quad (5)$$

В діапазоні значень кута повороту $\varphi \in [2\pi - \beta, 2\pi]$ відповідно маємо :

$$\begin{aligned} S(\varphi) &= \frac{1}{2} \int_{\varphi}^{2\pi} (\rho_2^2(\varphi) - R_0^2) d\varphi + \frac{1}{2} \int_0^{\varphi-(2\pi-\beta)} (\rho_2^2(\varphi) - R_0^2) d\varphi = \\ &= -\frac{a(2\pi - \beta)}{2} \varphi + \frac{a(2\pi - \beta)^2}{4} + a\pi^2 \end{aligned} \quad (6)$$

Із аналізу (5) та (6) можна дійти висновку, що площа отвору, через який світло попадає на фоточутливий шар фотодіоду, є лінійною функцією кута повороту модулятора відносно діафрагми.

Підставивши (5) та (6) у (4) отримуємо вираз, що пов'язує вихідну напругу фотоприймача F1 з кутом повороту φ .

$$U = \begin{cases} S_1 R \frac{I}{I^2} a \frac{\beta}{2} \varphi + S_1 R \frac{I}{I^2} a \frac{\beta^2}{4}, \varphi \in [0, 2\pi - \beta] \\ -S_1 R \frac{I}{I^2} \frac{a(2\pi - \beta)}{2} \varphi + S_1 R \frac{I}{I^2} \frac{a(2\pi - \beta)^2}{4} + S_1 R \frac{I}{I^2} a\pi^2, \varphi \in [2\pi - \beta, 2\pi] \end{cases} \quad (7)$$

Шляхом нескладних перетворень отримуємо залежність, яка зв'язує напругу U та кут повороту модулятора відносно діафрагми.

$$\varphi = \begin{cases} \frac{2l^2}{S_1 R l a \beta} U - \frac{\beta}{2}, \varphi \in [0, 2\pi - \beta) \\ \frac{2\pi - \beta}{2} + \frac{2\pi^2}{2\pi - \beta} - \frac{2l^2}{S_1 R l a (2\pi - \beta)} U, \varphi \in [2\pi - \beta, 2\pi] \end{cases} \quad (8)$$

Як слідує з (8), по вихідній напрузі фотоприймача F1 не можливо точно визначити кутове положення чи кутову швидкість валу об'єкту досліджень.

Тому використовується фотоприймач F2, призначення якого полягає у формуванні сигналу, який приймає значення логічної одиниці при $\varphi \in [2\pi - \beta, 2\pi]$ та логічного нуля в іншому випадку. Його функціональну схему наведено на рис. 3, а працює він слідує таким чином.

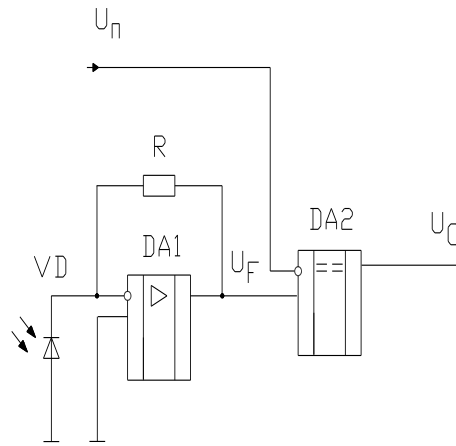


Рис. 3. Функціональна схема фотоприймача F2.

При обертанні модулятора перекриваються прорізи 7 та 9 модулятора і діафрагми. Площа освітлюемого фоточутливого шару фотодіоду фотоприймача F2 при вище описаній формі прорізів модулятора та діафрагми змінюється за трикутним законом. Відповідно за трикутним законом змінюється і вихідна напруга U_F операційного підсилювача DA1 (рис. 4). Внаслідок того, що прорізи 7 та 8 мають рівну кутову ширину, а прорізь модулятора 8 розташована на вісі ρ , при чому ця вісь співпадає з бісектрисою кута, проміні якого обмежують конфігурацію цієї прорізи, проміжок часу між серединами фронтів трикутної напруги співпадає з часовим проміжком формування заднього фронту напруги U . Для формування імпульсу напруги U_C , який свідчить про те, що кут повороту модулятора відносно діафрагми знаходиться в межах $\varphi \in [2\pi - \beta, 2\pi]$, служить компаратор DA2 (рис. 3), на неінвертуючий вхід якого подається опорна напруга U_P , що дорівнює половині амплітуди напруги U_F , а на інвертуючий вхід - напруга U_F .

Виходячи з вище сказаного, можна записати рівняння перетворення ТП.

$$U = \begin{cases} S_1 R \frac{I}{l^2} a \frac{\beta}{2} \int \omega(t) dt + S_1 R \frac{I}{l^2} a \frac{\beta^2}{4}, \text{ при } U_c = 0 \\ -S_1 R \frac{I}{l^2} a \frac{(2\pi - \beta)}{2} \int \omega(t) dt + S_1 R \frac{I}{l^2} a \frac{(2\pi - \beta)^2}{4} + S_1 R \frac{I}{l^2} a \pi^2, \text{ при } U_c = 1 \end{cases} \quad (9)$$

Залежність, що пов'язує вимірюєму кутову швидкість з вихідною напругою ТП має вигляд

$$\omega(t) = \begin{cases} \frac{2l^2}{S_1 R a l \beta} \frac{dU(t)}{dt}, \text{ при } U_c = 0 \\ -\frac{2l^2}{S_1 R a l (2\pi - \beta)} \frac{dU(t)}{dt}, \text{ при } U_c = 1 \end{cases}, \quad (10)$$

Рівняння, що зв'язує кут повороту модулятора відносно діафрагми з вихідною напругою ТП

$$\varphi = \begin{cases} \frac{21^2}{S_1 R I_a \beta} U - \frac{\beta}{2}, & \text{при } U_c = 0 \\ \frac{2\pi - \beta}{2} + \frac{2\pi^2}{2\pi - \beta} - \frac{21^2}{S_1 R I_a (2\pi - \beta)} U, & \text{при } U_c = 1 \end{cases}, \quad (11)$$

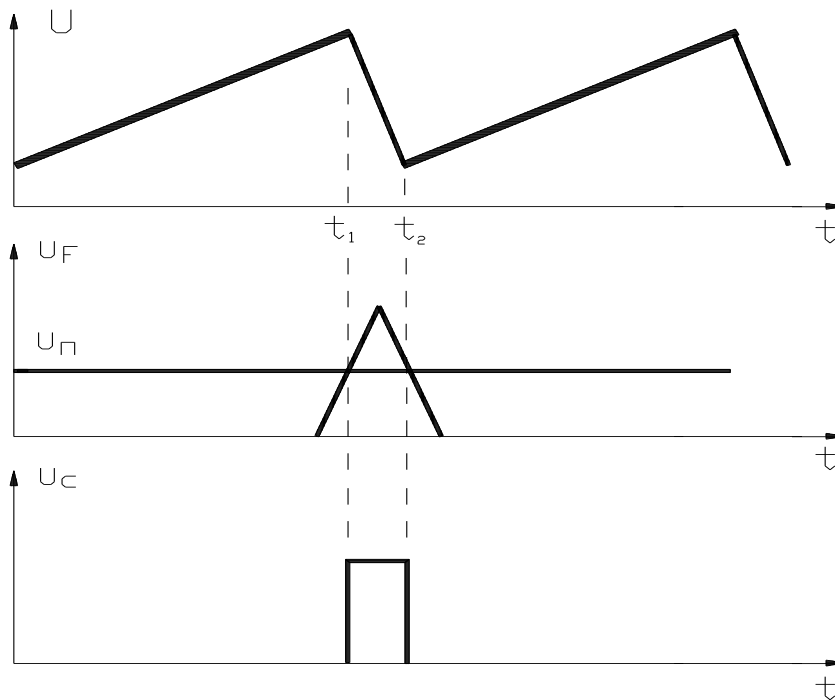


Рис. 4. Часові діаграми роботи ТП

Алгоритм визначення напрямку обертання :

- обертання відбувається за часовою стрілкою (у відповідності з рис. 1, б) якщо

$$\frac{dU(t)}{dt} > 0, \text{ при } U_c = 0$$

$$\frac{dU(t)}{dt} < 0, \text{ при } U_c = 1$$

- обертання відбувається проти часової стрілки якщо

$$\frac{dU(t)}{dt} < 0, \text{ при } U_c = 0$$

$$\frac{dU(t)}{dt} > 0, \text{ при } U_c = 1$$

**Пристрій для вимірювання та контролю
кутової швидкості та кутового положення**

Принцип дії комп'ютерного для вимірювання та контролю кутової швидкості та кутового положення, структурну схему якого наведено на рис. 5, полягає у наступному.

Вал об'єкту досліджень за допомогою муфти спряження з'єднується з валом ТП. Вихід ТП під'єднан до входу АЦП, який запускається імпульсами високостабільного генератору, частота якого відома з високою точністю. По закінченню перетворення цифровий код, відповідний миттєвому значенню вихідного сигналу ТП, за сигналом готовності АЦП, передається через в порт уведення-виведення та системну шину IBM PC до оперативної пам'яті, де знаходиться до обчислення кутової швидкості чи кутового положення.

Вихідний сигнал фотоприймача F2 сумується з старшим розрядом старшого байту вихідного коду АЦП, що дає можливість урахувати значення цього сигналу при обчисленнях.

У разі необхідності вимірювання залежності кутової швидкості або кута повороту від часу, поточний час розраховується програмно за формулою

$$t_i = (N - 1) \cdot T_G, \quad (12)$$

де N - число зафіксованих перетворень АЦП; T_G - період вихідного сигналу генератору, що запускає АЦП.

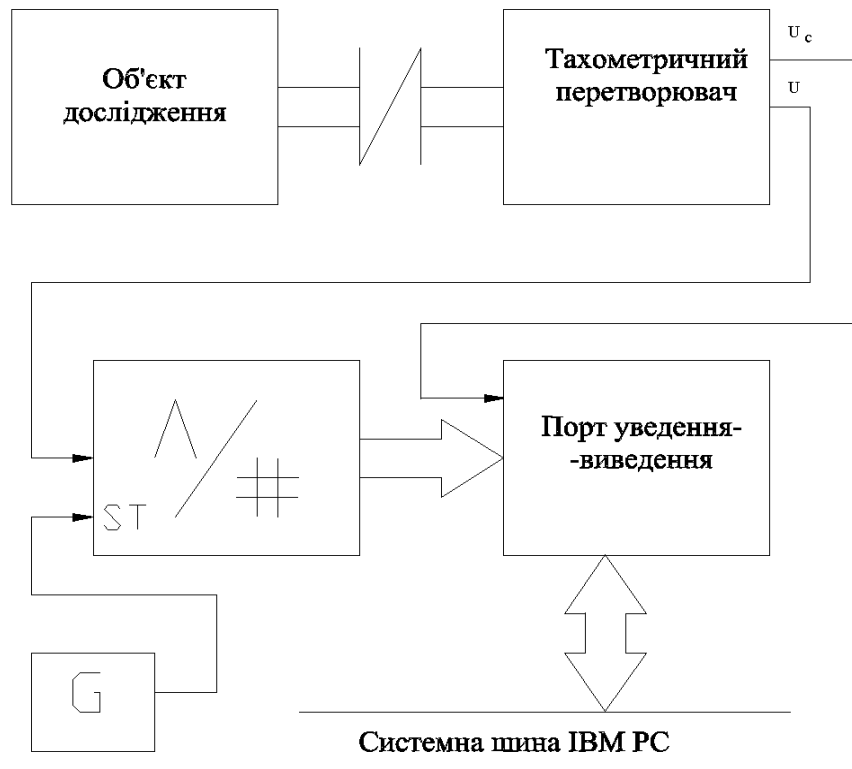


Рис. 5. Структурна схема пристрою для вимірювання та контролю кутової швидкості та кутового положення

Розрізнявальна здатність пристрою за кутом повороту залежить від кількості розрядів АЦП та визначається виразом

$$\varphi_0 = \begin{cases} \frac{2\pi - \beta}{2^n}, & \text{при } U_c = 0 \\ \frac{\beta}{2^n}, & \text{при } U_c = 1 \end{cases}, \quad (12)$$

де φ_0 - розрізнявальна здатність за кутом повороту; n - кількість двійкових розрядів АЦП.

Кутова швидкість розраховується за формулою:

$$\omega(t_i) = \begin{cases} \frac{21^2}{S_1 RaI \beta} \frac{U(t_i + \Delta t) - U(t_i)}{\Delta t}, & U_c = 0 \\ -\frac{21^2}{S_1 RaI (2\pi - \beta)}, & U_c = 1 \end{cases}, \quad (14)$$

де Δt - час дискретизації; $U(t_i + \Delta t)$, $U(t_i)$ - значення двійкового коду на виході АЦП в моменти часу $t_i + \Delta t$ та t_i .

Кут повороту визначається як

$$\varphi = \begin{cases} \frac{21^2}{S_1 RaI \beta} U(t_i) - \frac{\beta}{2}, & \text{при } U_c = 0 \\ \frac{2\pi - \beta}{2} + \frac{2\pi^2}{2\pi - \beta} - \frac{21^2}{S_1 RaI (2\pi - \beta)} U(t_i), & \text{при } U_c = 1 \end{cases}, \quad (15)$$

Коефіцієнти $\frac{21^2}{S_1 RaI \beta}$ та $\frac{21^2}{S_1 RaI (2\pi - \beta)}$ визначаються експериментально під час метрологічної перевірки пристрою.

Вираз (15) є виразом для звичайного цифрового диференціювання, в загальному випадку результуюча похибка якого складається з методичної похибки, похибки інтерполяції, похибки випадкових завад, інструментальних похибок.

До інструментальних похибок відносяться статична похибка, похибка, що обумовлена кінцевим часом відробки, похибка, що обумовлена кінцевим часом аналого-цифрового перетворення, похибка аналого-цифрового перетворення, похибка, обумовлена неточністю задання циклу.

Під методичною похибкою розуміється похибка методу вимірювання яка дорівнює різниці між середнім значенням швидкості зміни вихідного сигналу ТП на інтервалі дискретності та миттєвим її значенням у момент опитування. Аналіз похибок цифрового диференціювання наведено у [4].

Для даного пристрою характерною є систематична складова похибки, що обумовлена неточністю виконання прорізів модулятора та діафрагми і похибка, що обумовлена частотними властивостями фотоприймачів.

Висновки

Розроблений ТП має значні переваги серед розповсюджених в теперішній час частотних фотоелектричних. Завдяки його використанню можливе вимірювання та контроль кутові швидкості, кута повороту, кутового прискорення як в статичному, так і в динамічному режимі роботи об'єктів дослідження. ТП придатен для визначення початкового кутового положення, перед запуском об'єкту, що неможливо при використанні частотних ТП. Отримані рівняння перетворення та рівняння, що зв'язують інформативний параметр вихідного сигналу ТП з вхідними величинами, які є лінійними величинами. Синтезована авторами [3] форма прорізи модулятора та діафрагми обумовлює низькочастотний вихідний сигнал, що свідчить про добрі частотні властивості ТП. Описаний пристрій, на основі розробленого ТП, може проводити вимірювання динамічних залежностей кутової швидкості, кута повороту та кутового прискорення без сумісного вимірювання часу. Розроблений тахометричний перетворювач придатен для наукових досліджень та промислового контролю параметрів електромеханічних перетворювачів енергії.

ЛІТЕРАТУРА

1. В.В. Андрушук. Анализ погрешностей цифровых тахометров. // "Измерительная техника", №7, 1979.
2. Аксененко М.Д., Бараночников М.Л., Смолин О.В. Микроэлектронные фотоприемные устройства. - М.: Энергоатомиздат, 1984. — 208 с.
3. Поджаренко В.О., Михалевич В.М., Кулаков П.І. До питання вибору форми модулятора тахометричного перетворювача // "Вісник Вінницького політехнічного інституту", №1, 1988 р., стор. 12-18
4. Измерение скоростей (Измерительное дифференцирование). Левидов В.А., Тихонов О.Н., Цивирко Г.П. М., Изд-во стандартов, 1972, 258 стр.