

# Підвищення завадостійкості оптичних сенсорних пристроїв на основі конвертера імпедансу з струмовим зворотним зв'язком

К.ф.-м.н., доц. М. Вісьтак, д.т.н., проф. Р. Голяка, д.ф.-м.н., проф. З. Микитюк

Lviv Polytechnic National University  
Bandera street 12, 79013, Lviv, Ukraine

**Abstract.** The basis of the proposed solutions of signal converter is the impedance converter which provides the inductive impedance of the photosensitive sensor load circuit and, hence, the suppression of DC component of the photocurrent. The impedance converter is based on a circuit with current feedback.

**Keywords:** optoelectronic sensors, signal transducers, noise immunity.

**Вступ та аналіз задачі.** В сучасній сенсорній техніці, зокрема, пристроях дослідження хімічного складу газів, рідин, хімічних та біохімічних сполук, широке застосування знаходять оптичні методи формування інформативного сигналу [1, 2]. Такий сигнал обумовлюється селективним поглинанням чи відбиванням оптичного випромінювання від досліджуваної речовини чи активного середовища, що взаємодіє з останньою. Спектральна характеристика вимірюється оптопарою, яка складається з керованого, здебільшого, імпульсного джерела оптичного випромінювання, та фоточутливого елементу. Джерелом опромінювання можуть бути світлодіод, група світлодіодів зі зміщеними спектральними характеристиками, лазери, фотолюмінесцентні випромінювачі тощо, а фоточутливими елементами – фотодіоди, фототранзистори та фото-матриці на їх основі. В якості активного середовища використовують тонкоплівкові [3], зокрема, рідкокристалічні структури [4, 5].

Характерною проблемою сигнального перетворення оптоелектронних сенсорних пристроїв є значний паразитний вплив стороннього (неінформативного) оптичного випромінювання та електромагнітних завад. Так, інтенсивність випромінювання сторонніх джерел світла (сонця, ламп освітлення тощо) в сотні, а то і тисячі, раз перевищує корисну складову зміни оптичного сигналу від активного середовища, спектральна характеристика якого несе інформацію про досліджувану хімічну чи біохімічну речовину.

Типове вирішення вказаної проблеми шляхом «затемнення» сторонніх джерел світла протирічить вимозі до «відкритості» активного середовища, яке передбачає ефективну взаємодію цього середовища з оточенням. Малоєфективним є вирішення проблеми на оптичних фільтрах. По-перше, ефективність спектральної селекції оптичних фільтрів не є високою, а по-друге, використання таких фільтрів обмежує інформаційність корисного сигналу.

З метою вирішення вказаної проблеми в даній роботі представлені результати розроблення завадостійкого сигнального перетворювача оптичних сенсорних пристроїв, в основі функціонування якого вико-

ристано конвертер імпедансу з від'ємним струмовим зворотним зв'язком.

**Сигнальний перетворювач на конвертері імпедансу.** Розглянемо узагальнену блок-схему оптичного сенсорного пристрою (рис. 1). Інформативний сигнал сенсорного пристрою формується модуляцією спектральної характеристики активного середовища АМ (Active Medium), що взаємодіє з досліджуваною речовиною. Спектральна характеристика вимірюється оптопарою, що складається з керованого, здебільшого, імпульсного джерела світлового випромінювання LE (Light Emitter), та фоточутливого елементу PE (Photo Element). В залежності від параметрів пристрою джерелом світла можуть бути світлодіод, група світлодіодів зі зміщеними спектральними характеристиками, лазери, фотолюмінесцентні випромінювачі тощо, а фоточутливими елементами – фотодіоди, фототранзистори, фоторезистори тощо.

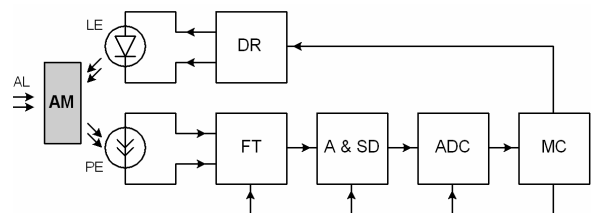


Рис. 1. Узагальнена блок-схема оптичного сенсорного пристрою

Крім інформативного сигналу  $LE \Rightarrow PE$ , на вході фоточутливого елементу присутній паразитний потік світла AL (Ambient Light) від сторонніх об'єктів, зокрема, Сонця чи джерел освітлення. В процесі подальшого сигнального перетворення вплив цього паразитного потоку світла повинен бути мінімізованим.

Режим роботи джерела світлового випромінювання LE задає драйвер DR (Driver), який зокрема, стабілізує струм живлення та випромінювальну характеристику цього джерела. Струм фоточутливого елементу PE селективно перетворюється в напругу вхідним перетворювачем FT (Front Transducer), далі – підсилюється, синхронно детектується A & SD (Amplifier and Synchro-Detector) та перетворюється в цифровий код ADC (Analog to Digit Converter). Процесом вимірювання керує мікроконтролер MC (Microcontroller).

Вузли розглянутої узагальненої блок-схеми є традиційними для більшості сенсорних пристроїв [6], а процес їх розроблення не вимагає спеціальних досліджень та нових рішень. Тому, в подальшому, ці

вузли не розглядаються. Натомість, основна увага приділена задачам підвищення завадостійкості оптоелектронного сенсора, що забезпечується схемними рішеннями та відповідно оптимізованими режимами роботи вхідного перетворювача FT. Основою цього перетворювача є конвертер імпедансу. Прикладом такого рішення є трансімпедансний підсилювач Transimpedance amplifier E909.07.ELMOS [7].

В сигнальному перетворювачі оптоелектронного сенсора конвертер імпедансу реалізує реактивне навантаження фоточутливого елемента, здебільшого, фотодіода чи фототранзистора. Елементарна схема такого навантаження наведена на рис. 2, а. На відміну резистивного навантаження конвертер імпедансу  $G$  забезпечує частотну селекцію сигналу – фотоструму  $I_{IN}$  зокрема фотодіода  $D_{PH}$ , придушуючи паразитний вплив сторонніх джерел світла та електромагнітних завод.

Принципово важливими є наступні фактори.

- по-перше, реалізація частотної селекції відбувається відразу у сигнальному колі фоточутливого елемента, формуючи високий імпеданс на частоті корисної складової фотоструму та низький імпеданс на частотах паразитних складових, що, забезпечує максимально високе відношення сигнал-завада;

- по-друге, схема конвертера не потребує індуктивних елементів, що відповідає вимогам до інтегральної мікроелектроніки;

- і, по-третє, крутизна функції частотної селекції, тобто, амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) перетворення фотострум – напруга, може бути суттєво вищою у порівнянні з індуктивним навантаженням і оптимізованою у відповідності параметрів сигнального перетворення.

Схема фотоприймача з використанням конвертера імпедансу в колі від'ємного зворотного зв'язку операційного підсилювача (ОА) наведена на рис. 2, б. Перевагою такої схеми є стабілізація напруги на фотодіоді, а недоліком – вузька смуга робочих частот внаслідок обмеження АЧХ ОА.

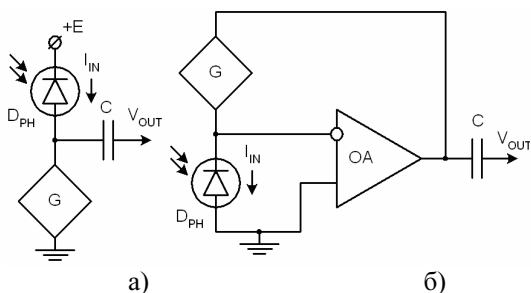


Рис. 2. Вхідні кола фотоприймачів на основі конвертерів імпедансу

**Конвертери імпедансу з від'ємним струмовим зворотним зв'язком.** Функціональна схема конвертера імпедансу з струмовим зворотним зв'язком наведена на рис. 3. Активним компонентом цієї схеми є інвертуючий струмовий конвеєр  $F_1$  з від'ємним коефіцієнтом передачі струму  $-K_F$ .

Функціонування конвертера описується системою рівнянь взаємних залежностей векторів (компле-

ксних амплітуд) напруг  $\dot{U}$ , струмів  $\dot{i}$  та комплексних імпедансів  $\dot{Z}$

$$\begin{cases} \dot{U}_G = (I_A + I_K)\dot{Z}_{IN} \\ I_K = K_F I_B \\ I_A = I_{RP} = I_{C1} + I_B \\ I_{C1} Z_{C1} = I_B R_1 \end{cases}, \quad (1)$$

де:  $\dot{Z}_{IN}$  - вхідний комплексний імпеданс конвертера;  $\dot{Z}_{C1} = 1/j\omega C_1$  - імпеданс конденсатора  $C_1$ ;  $\dot{I}_A$ ,  $\dot{I}_B$  - відповідно, вхідний та вихідний струм струмового конвеєра  $F_1$  з коефіцієнтом передачі  $-K_F$ ;  $\omega = 2\pi f$  - кругова частота;  $f$  - частота.

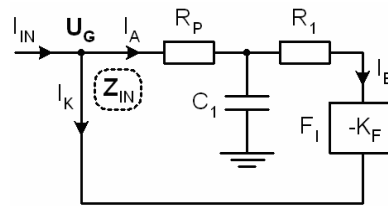


Рис. 3. Функціональна схема конвертера імпедансу з від'ємним струмовим зворотним зв'язком

Аналітичний розв'язок системи (1) показує, що, на протидію до конденсатора (в даній схемі -  $C_1$ ), в якому імпеданс спадає зі зростанням частоти, імпеданс  $Z_{IN}$  конвертера зростає – має місце необхідна для вирішення поставленої задачі інверсія імпедансу. Це, в свою чергу, забезпечує індуктивний характер імпедансу кола навантаження фоточутливого сенсора, а відтак, придушення обумовленої стороннім світлом постійної (паразитної) складової фотоструму.

Для подальшого, більш точного аналізу використаємо методи схемного SPICE моделювання. Синтезована у відповідності до рис. 3,а SPICE схема заміщення конвертера наведена на рис. 4. Кероване джерело струму, джерело гармонічної напруги  $V_{in}$  (в даному випадку корисної складової сигналу) та постійної напруги  $V_{dc}$  (в даному випадку паразитної складової) заміщає вихідне коло фоточутливого сенсора. Кероване джерело  $F_1$  заміщає струмовий конвеєр. Керуюче коло джерела  $G_{in}$  є потенціальними (напруговим), а джерела  $F_1$  – струмовим. Відтак,  $G_{in}$  є джерелом типу Linear Dependent source IofV, а  $F_1$  – типу Linear Dependent source IofI. У всіх далі наведених варіантах схем коефіцієнт перетворення «напруга-струм» джерела  $G_{in}$  є одиничним:  $K(G_{in}) = 1$ .

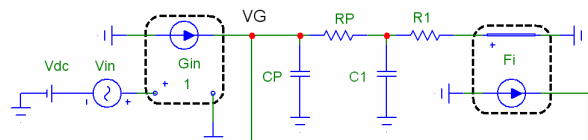


Рис. 4. SPICE схема заміщення конвертера імпедансу зі струмовим зворотним зв'язком

Приклади результатів модельних SPICE досліджень амплітудно-частотної (АЧХ)  $K_i$ , dB та фазо-частотної (ФЧХ)  $\text{Ph}$ , deg ( $^\circ$ ) характеристик конвертера імпедансу наведені на рис. 5 та рис. 6. Для обох ре-

зультатів досліджень незмінними є значення опорів  $R_1 = 10 \text{ k}$ ,  $R_p = 100 \text{ k}$ .

В першому дослідженні (рис. 5) проводилася дискретна зміна коефіцієнту передачі струму  $K_F$  конвеєра  $F_1$  ( $K_F = -1$  (1),  $-10$  (2),  $-100$  (3),  $-1000$  (4)), а ємність конденсатора  $C_1$  залишалася сталою  $C_1 = 100 \text{ n}$ . В другому дослідженні (рис. 6) змінювалося значення ємності  $C_1$  конденсатора ( $C_1 = 1 \text{ u}$  (1),  $100 \text{ n}$  (2),  $10 \text{ n}$  (3)), а коефіцієнт  $K_F$  залишався сталим  $K_F = -1000$ .

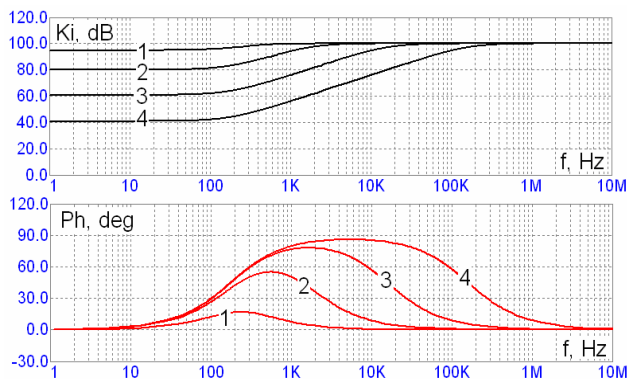


Рис. 5. АЧХ (зверху) та ФЧХ (знизу) конвертера при:  $K_F = -1$  (1),  $-10$  (2),  $-100$  (3),  $-1000$  (4)

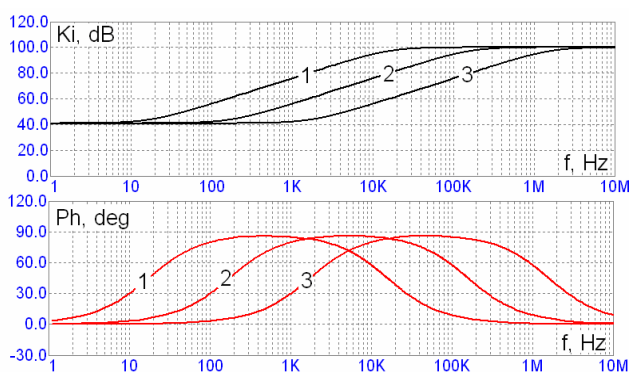


Рис. 6. АЧХ (зверху) та ФЧХ (знизу) конвертера при:  $C_1 = 1 \text{ u}$  (1),  $100 \text{ n}$  (2),  $10 \text{ n}$  (3)

Можна бачити характерну залежність фазової затримки  $Ph$  від коефіцієнту від'ємного зворотного зв'язку за струмом  $K_F$ . Зокрема, збільшення коефіцієнту  $K_F$  відповідає зменшенню імпедансу  $Z_{IN}$  на низьких частотах та збільшенню фазової затримки на частотах переходу між низькоімпедансним та високоімпедансним станами.

Важливими є наступні результати:

- фазова затримка між напругою та струмом є додатною, що відповідає індуктивному характеру імпедансу конвертера;
- максимальне значення фазової затримки, яке досягається при  $|K_F| \rightarrow \infty$ , становить  $90^\circ$ ;
- при зменшенні коефіцієнту  $K_F$  максимальне значення фазової затримки спадає, і, зокрема при  $K_F = -10$ , становить приблизно  $55^\circ$ ;
- зміна ємності конденсатора  $C_1$  призводить до зсуву АЧХ та ФЧХ, не змінюючи при цьому граничні значення імпедансу  $Z_{IN}$ , коефіцієнту перетворення  $K_1$  та фазового зсуву  $Ph$ ;
- АЧХ та ФЧХ конвертерів на моделях керованих джерел струму  $G_{in}$ ,  $F_i$  не залежить від постійного

рівня сигналу.

Таким чином, отримані результати SPICE досліджень підтверджують коректне функціонування схеми конвертера імпедансу та достатню точність наближеного аналітичного розрахунку.

**Висновки.** Характерною проблемою сигнального перетворення оптоелектронних сенсорних пристроїв є значний паразитний вплив стороннього (неінформативного) оптичного випромінювання та електромагнітних завад. З метою вирішення вказаної проблеми в даній роботі представлені результати розроблення завадостійкого сигнального перетворювача оптичних сенсорних пристроїв. В основі функціонування схеми використано конвертер імпедансу з від'ємним струмовим зворотним зв'язком.

Результатами аналітичних розрахунків показано, що має місце необхідна для вирішення поставленої задачі інверсія імпедансу – на протизагу до конденсатора, в якому імпеданс спадає зі зростанням частоти, імпеданс  $Z_{IN}$  конвертера зростає. Це, в свою чергу, забезпечує індуктивний характер імпедансу кола навантаження фоточутливого сенсора, а відтак, придушення обумовленої стороннім світлом паразитної складової фотоструму.

Проведені SPICE дослідження підтверджують коректне функціонування схеми конвертера імпедансу та достатню точність наближеного аналітичного розрахунку. Показано, зокрема, характерну залежність фазової затримки від коефіцієнту від'ємного зворотного зв'язку за струмом  $K_F$ . Збільшення коефіцієнту  $K_F$  відповідає зменшенню імпедансу  $Z_{IN}$  на низьких частотах та збільшенню фазової затримки на частотах переходу між низькоімпедансним та високоімпедансним станами.

[1]. Optical parameters of thin calixarene films and their response to benzene, toluene and chloroform adsorption / Y.M. Shirshov, S.A. Zynio, E.P. Matsas, etc. // *Supramolecular science*. - 2000. - Vol.4, No.3-4.- P. 491-494.

[2]. Пеньков М. Н. Оптические датчики кислорода // *Системы контроля окружающей среды*. - 2010. - Вып. 14. - С. 22-25.

[3]. Использование тонких пленок каликсаренов в качестве чувствительных слоев в интерференционном газовом сенсоре / А.А. Вахула, В.Ю. Хоруженко, А.Л. Кукла, И.А. Самойлова // *Оптоэлектроника и полупроводниковая техника*. -2007. - Вып.42. - С. 89-95.

[4]. Sridharamurthy, S.S.; Cadwell, K.D.; Abbott, N.L.; Hongrui Jiang. A Liquid Crystal Based Gas Sensor Using Microfabricated Pillar Arrays as a Support Structure // *IEEE Sensors* - 2007 PP. 1044 – 1047.

[5]. Jun Namkung; Yang Zou; Dan Ke; Yongbin Lin; Lindquist, R.G. Sensing characteristics of chemical agents by using liquid crystal-based chemical and biological sensors // *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) and Quantum Electronics and Laser Science Conference (QELS)*. - 2010 PP. 1 – 2.

[6]. Мікросхемотехніка. Підручник за ред. З.Ю. Готри / Гельжинський І.І., Голяка Р.Л., готри З.Ю., Марусенкова Т.А. – Львів Ліра-прес. 2015. – 492 с.

[7]. Transimpedance amplifier with high sensitivity E909.07.ELMOS Semiconductor AG. Data Sheet. – 2014. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.elmos.com>.