

# Завадостійкий сигнальний перетворювач оптичних сенсорних пристроїв

К.ф.-м.н., доц. М. Вісьтак

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

**Abstract.** The work concerns the further development of optoelectronic sensor's signal converters. The problem of minimizing the parasitic influence of stray uninformative optical radiation and electromagnetic interference is considered. An impedance converter which provides the inductive nature of the impedance of the photosensitive sensor load circuit is proposed and studied.

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

**Вступ.** Успіхи в галузях фізики твердого тіла, мікроелектроніки, інтегральної оптики та біофізики обумовили можливість розвитку нового напрямку вимірювальної техніки – хімічних та біохімічних сенсорів – аналітичних пристроїв якісного та кількісного визначення хімічних (біологічних) речовин [1]. Одним з актуальних напрямів сучасної сенсорики є оптичні (оптоелектронні) сенсори, активним середовищем яких є, зокрема, оптичні волокна [2] чи рідкі кристали [3]. Відносно простим та ефективним способом формування інформативного сигналу в оптичних сенсорах є кольорні вимірювання. Для реалізації цього способу використовують кольорні RGB (Red-Blue-Green) сигнальні перетворювачі [4].

Основною проблемою сигнального перетворення [5] оптичних 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 інформативність корисного сигналу.

Паразитний вплив електромагнітних завад в першу чергу обумовлений випромінюванням силової електромережі частотою 50 Гц. Інтенсивність такого випромінювання типово є значною, а екранування оптоелектронної пари сенсорного пристрою протирічить тій же вимозі до її «відкритості».

Особливо електромагнітна завада проявляється у високоомних колах, якими і є вхідні кола перетворювачів оптоелектронних сенсорних пристроїв – для забезпечення чутливості вхідний опір останніх типово становить десятки Мегаом.

Дана робота направлена на задачу подальшого розвитку сигнальних перетворювачів оптичних сенсорних пристроїв в напрямку підвищення завадостійкості, а відтак, покращення їх експлуатаційних характеристик.

**Структурна схема завадостійкого оптичного RGB сенсорного пристрою.** Блок-схема оптичного сенсорного пристрою наведена на рис. 1. Активним середовищем служить рідкокристалічний модулятор (LC modulator). Для визначення його спектральної характеристики використовують три світловипромінюючі елементи, зокрема світлодіоди – LED<sub>R</sub> (червоний), LED<sub>G</sub> (зелений), LED<sub>B</sub> (синій) та спільний фоточутливий елемент, зокрема, фотодіод PHD (рис. 1). Такі світлодіоди можуть інтегруватися в єдиний корпус, як це можна показати на прикладі RGB модуля Cree® PLCC4 3 in 1 RGB SMD LED CLMUC-FKA (рис. 2) [6].

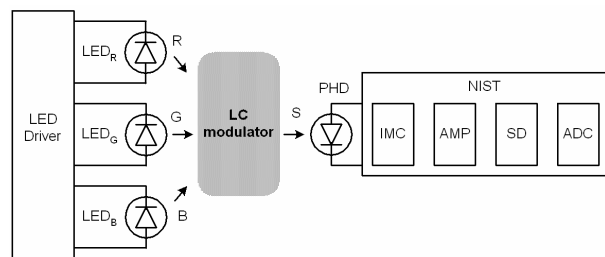


Рис. 1. Блок-схема оптичного сенсорного пристрою

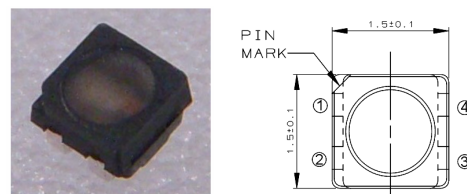


Рис. 2. RGB світлодіодний модуль Cree® PLCC4

Керування режимами роботи світлодіодів здійснюється схемою драйвера LED Driver, а сигнал фотодіода (фотострум) перетворюється, підсилюється та оцифровується з допомогою схеми сигнального конвертера NIST (Noise Immune Signal Transducer). В його склад входять IMC – конвертер імпедансу, AMP – підсилювач, SD – синхронний детектор, ADC – аналого-цифровий перетворювач.

Інформативний сигнал S представляє собою три послідовно отримані RGB складові - S<sub>R</sub>, S<sub>G</sub> та S<sub>B</sub>, за співвідношенням між якими визначають спектральну характеристику активного середовища, а відтак, кількісний чи якісний склад досліджуваного газу чи рідини.

Висока завадостійкість запропонованого оптичного сенсорного пристрою, як до сторонніх (паразитних) джерел світла, так і до електромагнітних завад забезпечується вже згаданим конвертером імпедансу. Розглянемо його функціонування та параметри.

**Функціональна SPICE модель конвертера імпедансу.** В сигнальному перетворювачі оптичного сенсора конвертер імпедансу реалізує реактивне навантаження fotocутливого елемента, зокрема, фотодіода. На відміну резистивного навантаження конвертер імпедансу забезпечує частотну селекцію сигналу – фотоструму, придушуючи паразитний вплив сторонніх джерел світла та електромагнітних завад. Принципово важливими є наступні фактори.

По-перше, реалізація частотної селекції відбувається відразу у сигнальному колі fotocутливого 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.

На противагу до конденсатора, в якому імпеданс спадає зі зростанням частоти, імпеданс конвертера зростає - місце необхідна для вирішення поставленої задачі інверсія імпедансу. Це, в свою чергу, забезпечує індуктивний характер імпедансу кола навантаження фотодіода, а відтак, придушення обумовленої стороннім світлом постійної (паразитної) складової фотоструму.

Функціональна SPICE модель (схема заміщення) конвертера наведена на рис. 3. Кероване джерело струму  $G_{in}$ , джерело гармонічної напруги  $V_{ac}$  (в даному випадку корисної складової сигналу) та постійної напруги  $V_{dc}$  (в даному випадку паразитної складової) заміщає сигнал фотодіода. Конвертер імпедансу реалізовано на фільтрі низьких частот (коло  $R_1$ ,  $C_1$ ), повторювачі напруги  $X_1$  та резисторі зворотного зв'язку  $R_2$ .

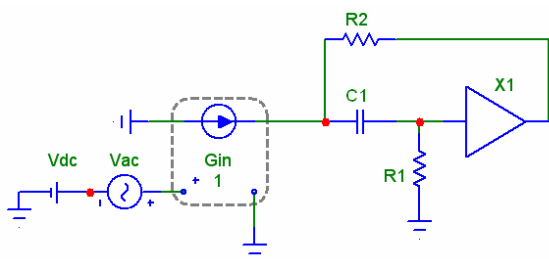


Рис. 3. SPICE схема заміщення конвертера імпедансу

Результати модельних досліджень амплітудно-частотних (АЧХ) та фазо-частотних характеристик (ФЧХ) (рис. 4, рис. 5) підтверджують задану функціональність конвертера імпедансу, для якої характерний додатний, тобто «індуктивний», зсув фази. Коефіцієнт перетворення  $K_i$  визначається на високих частотах

опором резистора  $R_1$ , а на низьких частотах – резистора  $R_2$  (рис. 4). При зміні цих опорів відбувається відповідне розширення чи звуження діапазону частот, в якому відбувається зсув фази. Натомість, зміна ємності  $C_1$  (рис. 5) обумовлює зсув АЧХ та ФЧХ по осі абсцис без зміни ширини діапазону частот зсуву фази.

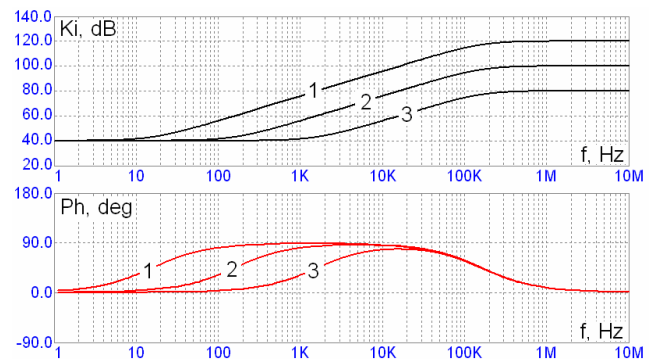


Рис. 4. АЧХ (зверху) та ФЧХ (знизу) конвертера при:  $C_1 = 10$  n;  $R_2 = 100$ ;  $R_1 = 1000$  k (1), 100 k (2), 10 k (3)

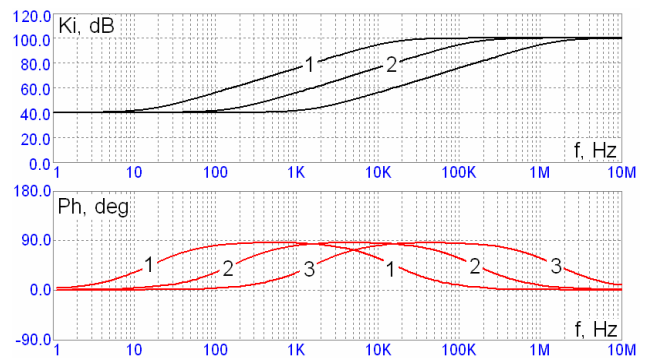


Рис. 5. АЧХ (зверху) та ФЧХ (знизу) конвертера при:  $R_1 = 100$  k;  $R_2 = 100$ ;  $C_1 = 100$  n (1), 10 n (2), 1 n (3)

**Реалізація конвертера імпедансу.** Схемна реалізація конвертера імпедансу оптичного сенсора на транзисторному каскаді наведена на рис. 6, а. Схема забезпечує придушення постійного рівня та низькочастотних складових струму  $I_{IN}$  фотодіода  $D_{PH}$ .

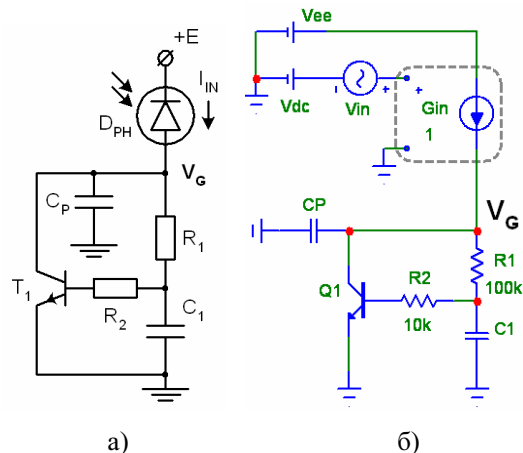


Рис. 6. Схема (а) та SPICE модель (б) конвертера імпедансу та транзисторному каскаді

Зворотне зміщення останнього та функціонування транзисторного каскаду здійснює джерело живлення  $+E$ . На низьких частотах (при  $\omega \rightarrow 0$ ) імпеданс

конденсатора  $C_1$  прямує до нескінченності  $Z_{C1} \rightarrow \infty$ , а відтак, в першому наближенні коефіцієнт передачі  $K_F$  струмового від'ємного зворотного зв'язку за модулем приблизно рівний коефіцієнту підсилення базового струму транзистора  $K_F \approx V_F$ , де  $V_F = I_C/I_B$ ,  $I_C$  та  $I_B$  – відповідно, колекторний та базовий струми. На високих частотах (при  $\omega \rightarrow \infty$ ) імпеданс конденсатора прямує до нуля  $Z_{C1} \rightarrow 0$ , а отже відбувається шунтування базового кола транзистора. Це, в свою чергу, призводить до мінімізації зміни колекторного струму  $\Delta I_C \rightarrow 0$ , а отже  $K_F \rightarrow 0$ .

Резистор  $R_2$  введено для покращення функціональності – шляхом зміни опору цього резистора забезпечується можливість більш точного налаштування схеми під бажану характеристику. Конденсатор  $C_p$ , як і в попередньо розглянутих функціональних схемах, дозволяє сформувати резонансну характеристику перетворення, що підвищує селективність до частоти корисного сигналу.

Наведені далі результати модельних досліджень такої схеми конвертера базуються на SPICE схемі заміщення у відповідності до рис. 6, б. Джерело  $V_{ee}$  задає напругу живлення схеми, а джерела  $V_{dc}$  та  $V_{in}$  – постійну (паразитну) та змінну (корисну) складові сигналу. Кероване джерело  $G_{in}$  моделює вихідний струм фотодіода  $D_{PF}$ . Приклади АЧХ та ФЧХ аналізованої схеми наведені на рис. 7 (при зміні ємності  $C_1$ ) та рис. 8 (при зміні ємності  $C_p$ ).

Можна бачити, що при заданих параметрах елементної бази, зокрема  $V_F = 300$ ,  $R_1 = 100$  к, конвертер на біполярному транзисторі забезпечує зростання коефіцієнту перетворення  $K_i$ , та імпедансу  $Z_{IN}$  ( $Z_{IN} = K_i$ ) з 65 дБ при  $\omega \rightarrow 0$  до 100 дБ при  $\omega \rightarrow \infty$ . Крутизна АЧХ відповідає фільтрам першого порядку і становить 20 дБ на декаду. Зсув фази є додатним, що підтверджує індуктивний характер імпедансу  $Z_{IN}$ . Максимальне значення зсуву становить  $75^\circ$ .

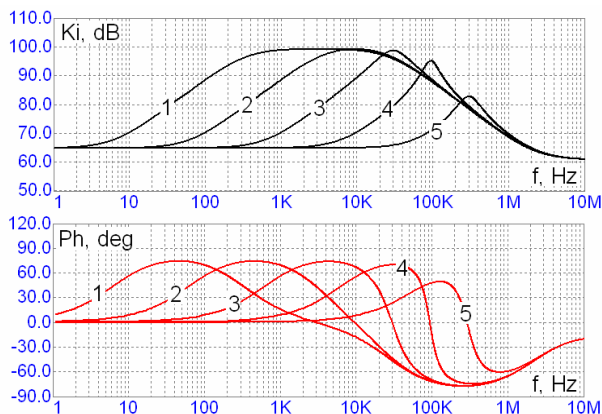


Рис. 7. АЧХ (зверху) та ФЧХ (знизу) конвертера при  $V_F = 300$ ,  $R_1 = 100$  к;  $C_p = 0$ ;  $C_1 = 1$  н (1), 100 н (2), 10 н (3), 1 н (4), 100 п (5)

Важливим є факт, що зменшення ємності  $C_1$  не лише зсуває АЧХ в сторону вищих частот, але і звужує смугу робочих частот. Граничне значення ємності  $C_1$ , при якому зберігається максимальне значення імпедансу (100 дБ), становить  $C_1 \approx 10$  н (АЧХ (3), рис. 7). Подальше зменшення  $C_1$  є неефективним.

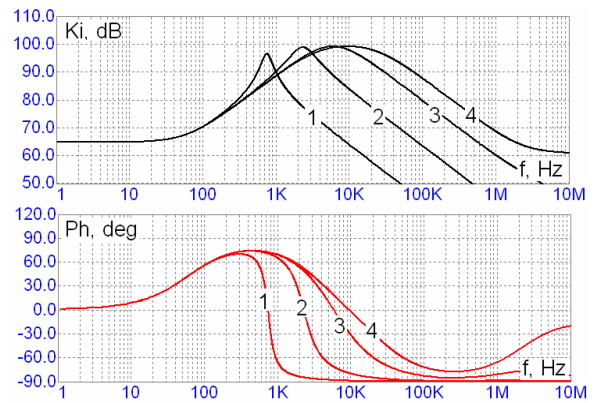


Рис. 8. АЧХ (зверху) та ФЧХ (знизу) конвертера при  $R_1 = 100$  к;  $C_1 = 100$  н;  $C_p = 10$  н (1), 1 н (2), 100 п (3), 0 (4)

При реалізації резонансних схем селекції з використанням шунтуючого конденсатора  $C_p$  АЧХ зсувається в сторону нижчих частот. При цьому, внаслідок резонансного викиду АЧХ, представляється можливим дещо підвищити коефіцієнт передачі на низьких частотах (АЧХ (2), рис. 8). Крім того, результати досліджень показують, що зсув фази в транзисторному каскаді з резонансною характеристикою не перевищує допустимі межі стабільності функціонування конвертера.

**Висновки.** Представлені результати розроблення та модельного дослідження завадостійкого сигнального перетворювача оптичних сенсорних пристроїв. В основі функціонування схеми використано конвертер, імпеданс якого зростає зі зростанням частоти. Це забезпечує індуктивний характер імпедансу кола навантаження фотодіода, а відтак, придушення обумовленої стороннім світлом паразитної складової фотоструму.

Розглянуто реалізацію конвертера імпедансу оптичного сенсора на транзисторному каскаді. Показано, що при  $V_F = 300$ ,  $R_1 = 100$  к конвертер забезпечує зростання коефіцієнту перетворення  $K_i$ , та імпедансу  $Z_{IN}$  ( $Z_{IN} = K_i$ ) з 65 дБ при  $\omega \rightarrow 0$  до 100 дБ при  $\omega \rightarrow \infty$ .

[1]. Fraden. J. Handbook of modern sensors: Physics, design, and applications / J. Fraden. – Springer, 2004. – 580 p.

[2]. Allsop, T.; Neal, R.; Mou, C.; Brown, P.; Rehman, S.; Kalli, K.; Webb, D.J.; Mapps, D.; Bennion, I. Multilayered coated infra-red surface plasmon resonance fibre sensors for chemical sensing // European Conference on Lasers and Electro-Optics CLEO Europe. – 2009. – P.1.

[3]. 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.

[4]. Young-shin Kwon; Won-Jong Kim. Development of a New High-Resolution Angle-Sensing Mechanism Using an RGB Sensor // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. – 2014. Vol. 19, N. 5. – PP. 1707 – 1715.

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

[6]. Cree® PLCC4 3 in 1 RGB SMD LED CLMUC-FKA. [Електронний ресурс] – Режим доступу: [http:// www.cree.com/~ /media/Files/Cree/LED~.pdf](http://www.cree.com/~ /media/Files/Cree/LED~.pdf).