

УДК 004.3

АНАЛІЗ ОПТОЕЛЕКТРОННИХ ЛОГІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ КВАЗІІМПУЛЬСНОПОТЕНЦІАЛЬНОГО ТИПУ

М.П. Проскурін, О.В. Щекотіхін, С.С. Грушко. Запорізький національний
технічний університет.

В.Л. Костенко. Одеський національний політехнічний університет.

Проведена оцінка схем оптоелектронних логічних елементів квазіімпульснопотенціального типу, їх входних і вихідних ланцюгів. Для підвищення частоти модуляції сигналу світлодіоду на виході схем оптоелектронних логічних елементів запропоновано використовувати режим малого сигналу. Проаналізовані залежності загасання випромінювання між модулями передачі і приймання для джерел випромінювання і фотоприймачів від частоти для їх відбору. Обґрунтовується актуальність подальших досліджень в галузі інтеграції схем оптичних логічних елементів в цифрові оптоелектронні інтегральні схеми

Ключові слова: оптоелектроніка, оптипара, світлодіод, фотоприймач, волоконнооптичний канал, цифровий сигнал, логічний базис, оптоелектронні логічні елементи, цифрові автомати.

Вступ

Переваги волоконнооптичних ліній зв'язку (ВОЛЗ), в яких широко використовуються оптоелектронні пристрої (ОЕП), а також засобів і систем зв'язку на їх основі над електронними мають досить переконливий характер, який обумовлено в значній мірі тим, що оптичний сигнал від випромінювача без суттєвих втрат проходить до фотоприймача (ФП) волоконнооптичним каналом (ВОК) значні відстані (до декількох сотень і більше кілометрів), ВОЛЗ мають гальванічну розв'язку, широкую смугу пропускання, можливість передачі по одному ВОК кількох сотень і більше потоків цифрових сигналів (ЦС), відсутність впливу електромагнітних перешкод (ЕМП) на нього та ін. [1]. Тому дослідження в галузі розробки оптоелектронних елементів ВОЛЗ є перспективними.

Постановка завдання

В відомих ВОЛЗ після детектування N входних оптичних цифрових сигналів (ЦС) з ВОК і перетворення в електронні ЦС виконується їх розподіл мультиплексорами на M вихідних за заданим алгоритмом дії та обробка цифровими ІС. Разом з тим в [2, 3] досліджуються схеми оптоелектронних логічних елементів (ОЛЕ) квазіімпульсно-потенціального типу (КІПТ) і оптоелектронні логічні пристрої (ОЛП) на їх базі, які в деяких випадках можуть бути альтернативою відомим логічним інтегральним схемам (ЛІС). Оптоелектронні схеми вентилів КІПТ можуть обробляти оптичні ЦС без участі електронних ІС, містять у своєму складі елементи оптипар – світлодіоди (СД), випромінювачі (В), підсилювачі фотоструму (ПФ), фотоприймачі (ФП) і мають усі переваги оптичного зв'язку. Узагальнена структурна схема ОЛЕ КІПТ, показана рис. 1а [3].

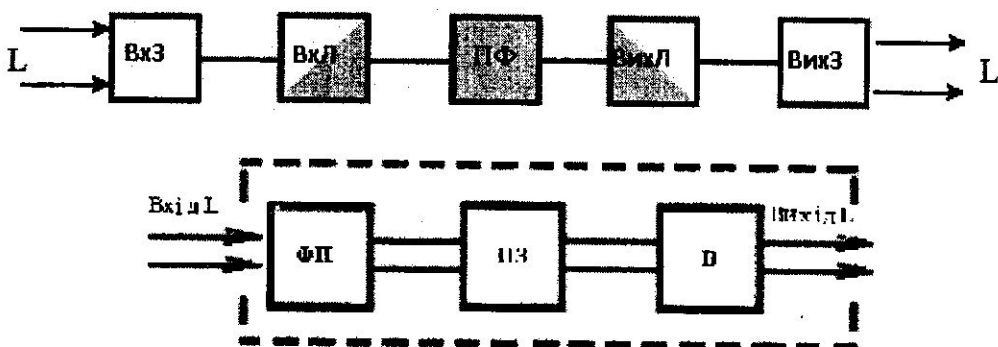


Рис. 1. Оптоелектронні логічні елементи:

1а – узагальнена структурна схема оптоелектронного логічного елемента,
ВхЗ, ВхЛ, ВихЗ, ВихЛ – входні, вихідні зв'язки і логіки; ПФ – підсилювач фотоструму;
1б – схема оптрона з оптичними входом і виходом

Слід відмітити, що з'єднання ОЛЕ в ланцюжки, аналогічно цифровим ІС на основі відомих ЛПС, дає можливість застосування елементів оптопар в якості логічних елементів. В останньому випадку входними, вихідними ВОК такого пристрою є оптичні входи і виходи елементів оптопар. На рис. 1а оптичні процеси (L) зазначені білими кольорами, електронні (E) – темним, оптоелектронні (L $\leftrightarrow$ E) – кордоном між ними. Відзначимо, що схема оптрона з оптичним входом і виходом (рис. 1б) [1] функціонально збігається зі схемами ОЛЕ КІПТ і ОЛПІ на їх основі [3]. Їх відмінною рисою є наявність виключно оптичних логічних входів і виходів при збереженні електронного “ядра” схеми. Такі схеми, до складу яких входять окремі елементи оптопар: СД, ФП та ін., – призначені для логічної обробки потоків входних і вихідних ЦС з виходів ВОК, або перетворених у світлові ЦС електричних ЦС. Але аналіз схем і режимів їх функціонування не виявляє серед них такі, які б мали параметри, близькі до відомих типів логіки – Т²ЛШ, І²Л, ЕЗЛ, МОН, К-МОН, МЕН, ін. Разом з тим, на нашу думку, недостатньо уваги приділяється дослідженням, розробці та впровадженню ОЛЕ та ОЛПІ. В роботі було поставлено завдання обґрунтування актуальності подальших досліджень в галузі розробки мало- і мікропотужних схем ОЛЕ, ОЛПІ та інтеграції схем оптичних логічних елементів в цифрові оптоелектронні інтегральні схеми.

Основний матеріал та результати

Аналіз логіки НАБО-НІ, МІ-НІ проводився на схемах КІПТ з оптичними логічними входами і електричними виходами, наведених на рис. 2а, б. Реалізація довільно заданих вихідних логічних функцій Y (для N входних оптичних змінних здійснюється на основі комбінацій схем ОЛЕ з урахуванням виконання входної і вихідної логіки [3]. Встановлено, що при виборі між схемами базисів НАБО-НІ та МІ-НІ певну перевагу має перший через зручну реалізацію схеми ОЛЕ: при збільшенні кількості входних змінних з двох до N для схем першого базису (рис. 2а) значення напруги схеми E залишається незмінним, а для другого (рис. 2б) воно повинне бути збільшене пропорційно N – кількості ФП (для їх нормального функціонування). Це обмежує застосування схем базису МІ-НІ в регулярних оптоелектронних структурах (величини напруг у схемах мають стандартний ряд значень, а їх кількість повинна бути мінімальною). Оцінка показує, що схему ОЛЕ типу НАБО-НІ можливо реалізовувати на основі оптопар типу СД-ФП із N оптичними входами і одним інверсним оптичним виходом (рис. 2д) і взяти її за основу для дослідження і розробки мало- і мікро потужних схем ОЛЕ ВЧ і ДВЧ діапазонів [4]. Такі ОЛЕ вміщують не менш двох оптопар – по входу і виходу. ОЛЕ НАБО-НІ вміщує N ФП і один СД, що по кількості елементів може відповідати елементам однієї оптопари з декількома ФП: типу фотодіод (ФД), фоторезистор (ФР), фототранзистор (ФТр), фототиристор (ФТ) (типу: АОД111А, ОЭП-7, ЗОР125А).

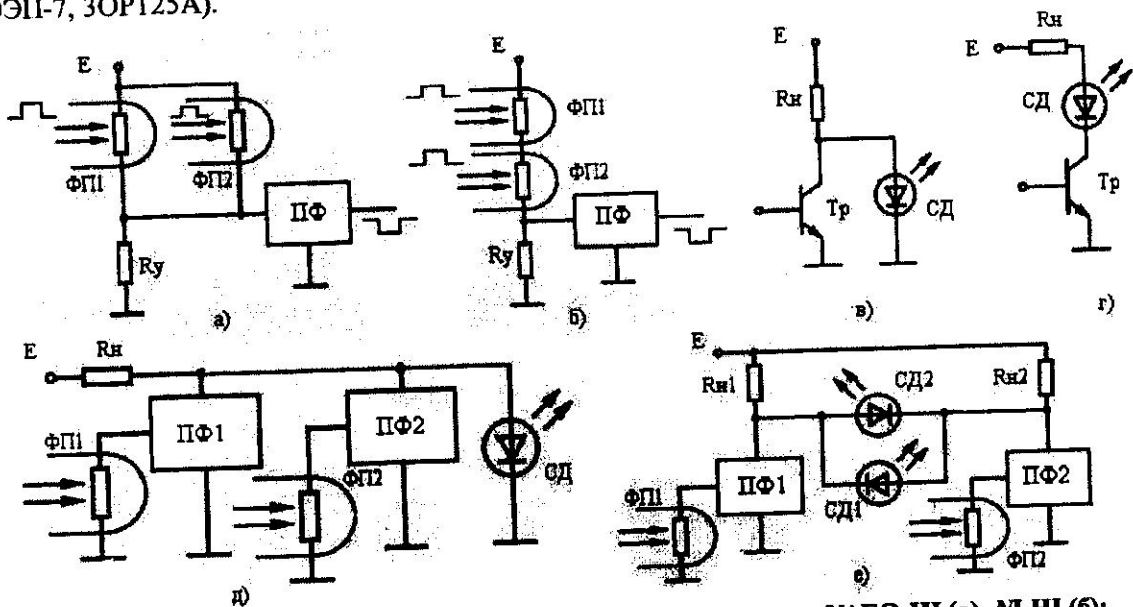


Рис. 2. Реалізація схем входної логіки для: функцій базису: НАБО-НІ (а), МІ-НІ (б); схем включення СД на виході (в, г); схема оптоелектронної логіки 2АБО-НІ (д), виключне АБО (е)

Зазначені оптопари забезпечують коефіцієнт розгалуження по виходу схем ОЛЕ КІПТ $K_p \sim 2 \dots 4$. У схемах на рис. 2в, г для перемикання вихідного СД необхідно подати на базу транзистора імпульс. Час вмикання (вимикання): $t_{\text{вм/вим}} = (t_{\text{вм}} + t_{\text{вим}})/2$. У схемах (рис. 2в, г) для перемикання СД звичайно використовують середню частину лінійної ВАХ СД, тому час релаксації СД у стан досить великий [1]. Параметри ланцюжків ОЛП на ОЛЕ 2АБО-НІ СД на дискретних оптопарах досліджено в роботі [5]. Знижене значення напруги вмикання, вимикання СД і підвищену швидкість його перемикання може мати схема за рис. 2в у режимі малого сигналу. Для цього на ВАХ СД визначається граничний струм $I_{\text{СД пор.}}$ прямозміщеного p - n переходу, на який накладається сигнал модуляції на робочій частоті f_p при значенні його амплітуди в 5-10% відсотків від величини $I_{\text{СД пор.}}$ [1]. У схемі рис. 2в вимикання СД здійснюється зменшенням напруги $U_{\text{СД пор.}}$ нижче напруги його включення $U_{\text{СД вимк.}}$ (однак близьким до нього) завдяки транзисторному ключу. Струм прямого зсуву $I_{\text{Пр.СД}}$, що протікає через резистор R_1 при замкненому транзисторі, тече через СД, забезпечуючи його випромінювання. При подачі вмикаючого імпульсу на базу Tr , останній відкривається і шунтує СД, а його напруга $U_{\text{Е-К}}$ має у відкритому стані значення менше, ніж $U_{\text{СД вимк.}}$. Тому СД у схемі рис. 2в перестає випромінювати, а більша частина струму $I_{\text{Пр.СД}}$ протікає через транзистор Tr , що грає роль короткозамкненого ключа. Схема на рис. 2в може реалізовувати режим «малого сигналу», при якому СД має підвищену швидкодію – приблизно на порядок вище, ніж схема за рис. 2г. Це реалізовано за рахунок того, що при перемиканні СД не відбувається повного перезарядження ємностей його p - n переходів і керуючого транзистора Tr (що працює в ненасиченому режимі) і малої різниці в значеннях напруг вмикавання – $U_{\text{СД вимк.}}$ і вимикання – $U_{\text{СД вимк.}}$. Різниця може становити 0,1 В і менше (залежно від параметрів схеми, СД і транзистора). Граничну частоту $f_{\text{Гр.СД}}$ визначають на рівні значення 0,7 величини потужності $P_{\text{Випр.}}$ у режимі «малого сигналу» накладанням на струм $I_{\text{Пр.СД}}$ гармонійного збурювання, згідно:

$$I_{\text{Пр.СД}}(t) = I_{\text{Пр.СД}} + dI_{\text{Пр}} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t),$$

де: $I_{\text{Пр.СД}}(t)$ – миттєве значення прямого струму СД;

$dI_{\text{Пр}}$ – амплітудне значення приросту значення струму СД;

$I_{\text{Пр.СД}}$ – струм прямого зсуву СД.

Порівняльний аналіз часових характеристик струму, напруги й потужності випромінювачів типу лазерного діоду (ЛД), СД при модуляції в режимах «великого» і «малого» сигналу показує що їх інерційність у режимі малого сигналу досить значно відрізняється від режиму великого сигналу. Теоретично граничні значення $t_{\text{Випр.}} \sim (t_{\text{CL}} + t_{\text{CL}}) \leq 0,25$ нс (для GaAlAs випромінювачів у режимі малого сигналу), гранична частота перемикань – $f_{\text{Гр.СД}} \leq 2$ ГГц.

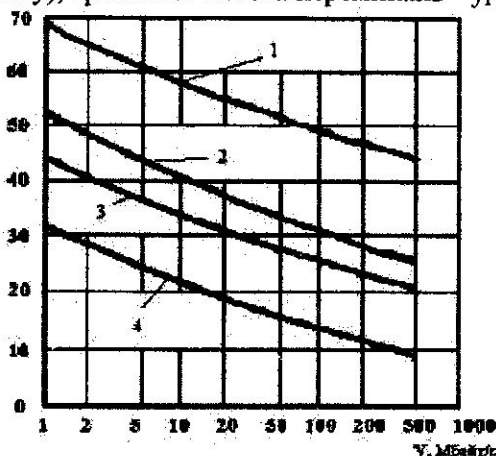


Рис. 3. Залежність припустимого загасання випромінювання між передавальними, приймаючими модулями для різних джерел випромінювання і ФП від швидкості передачі:

1 – ЛД + ЛФД; 2 – ЛД + p - i - n ФД; 3 – СД + ЛФД; 4 – СД + p - i - n ФД

При швидкості передачі 0,3-0,5 ГГц величина припустимого загасання в «довгих оптопарах» типу СД – p - i - n ФД мінімальна і лежить у межах 10 дБ і менш, як показано на нижній кривій рис. 3, а для малих відстаней (0,001-10 см) її можна не брати до уваги зовсім. Такий підхід відкриває нові можливості розвитку елементної бази оптоелектронних пристроїв на основі

елементів оптопар типу СД – p - i - n ФД (у тому числі у вигляді схем ОЛЕ, ОЛП КІПТ) і викори-

створення оптичного середовища для організації між'єднань (оптичних інтерфейсів та створення
оптоелектронних цифрових ІС (для ОП і ЦА), що можуть конкурувати з відомими типами електронних ІС.

До переваг схем ОЛЕ КІПТ можна віднести: зменшення часу затримки на порядок (наприклад, з ~ 1 нс до $\sim 0,1$ нс при довжині ВОК ~ 10 мм); відсутність «загального» дроту і односпрямованість при використанні ВОК, гальванічна розв'язка каскадів; високий ККД, завадозахист, простота інтерфейсів; можливість передачі по одному ВОК значної кількості ЦС на різних довжинах хвиль, що спрощує організацію багаторозрядних шин (даних, адреси, управління) у сучасних типах цифрових пристроїв.

На основі проведених досліджень, аналізу і оцінки схем ОЛЕ КІПТ для обробки ЦС можна зробити наступні **висновки**:

1. При виборі з двох мінімальних базисів НАБО-НІ, М-НІ вхідної оптоелектронної логіки схем ОЛЕ КІПТ переваги має перший через постійність напруги живлення ФП для реалізації N логічних входів в схемі НАБО-НІ.

2. При модуляції вихідних випромінювачів в схемах ОЛЕ перевагу за частотою перемикавання мають схеми із шунтуванням СД (рис. 2в), що дозволяє реалізувати його модуляцію в режимі «малого сигналу». Дослідження цього режиму модуляції у складі мало- і мікропотужних схем ОЛЕ КІПТ і їх реалізація дає можливість створення схем оптоелектронної логіки і цифрових ІС на їх основі, які є конкурентними відомим типам логіки ІС.

3. Досліджені типи схем ОЛЕ КІПТ базуються на відомих елементах оптоелектроніки. Поєднання переваг оптичного засобу зв'язку з перевагами «електронного ядра» ОЛЕ дозволяє їх використання в цифрових оптоелектронних ІС для створення пристроїв оптоелектронної логіки, а також для побудови перехідних інтерфейсів (електронний $\leftrightarrow$ оптичний $\leftrightarrow$ електронний), зв'язку цифрових автоматів з різною елементною базою.

4. Пристрої оптоелектронної логіки на базі мікропотужних схем ОЛЕ КІПТ ДВЧ і УВЧ діапазонів можуть сполучати у собі оптоелектронні процеси і їх переваги, вбирати в себе технологічні досягнення мікро- і наноелектроніки, ОЕП оперують оптичними вхідними, вихідними ЦС на близьких до максимальних частотах (1-10 ГГц) для відомих напівпровідникових пристроїв (СД, ФД, Тр). Перспективною є локалізація області проходження електронних процесів в p - n переходах активних частин УВЧ оптопар (ФП, СД і резисторів).

5. Дослідження і розробка нових мало- і мікропотужних схем оптоелектронної логіки ВЧ, ДВЧ і УВЧ діапазонів є актуальними, а застосування схем ОЛЕ КІПТ в ІС дозволить знизити споживану потужність, реактивність ліній логічних пристроїв, зменшити час затримки ЦС, підвищити широкосмужність інтерфейсів і зв'язків в ІС.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Фриман, Р. Волоконно-оптические системы связи / Р. Фриман. – М. : Техносфера, 2003. – 450 с.
2. Кравченко, О. П. Фізичні основи функціональної мікроелектроніки / О. П. Кравченко. – К. : Либідь, 1993. – 216 с.
3. Кожемяко, В. П. Функциональные элементы и устройства оптоэлектроники / В. П. Кожемяко, Л. И. Тимченко, Г. Л. Лысенко, Ю. Ф. Кутаев. – К. : УМК ВО, 1990. – 251 с.
4. Декл. Патент № 45670А. Україна, МКИ G02F 3/00. Оптоэлектронный микрopotужный интегральный логический пристрій НАБО-НІ адаптивного типу з розширеними функціональними можливостями – PROCOS / М. П. Проскурін, В. Л. Костенко. – № 45670 А; заяв. 30.05.2001 ; опубл. 15.04.2002, Бюл. № 4.
5. Костенко, В.Л. Оптоэлектронные элементы для датчиков и систем управления / В. Л. Костенко, Н. П. Проскурін // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск – Проблеми сучасної електротехніки. – 2002. – Ч. 2. – С. 43-45.