

УДК 004.415:621.315(045)

Красовська Є.В.

## ЗМЕНШЕННЯ РОЗСІЮВАНОЇ ПОТУЖНОСТІ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ НА ОСНОВІ КМОН-ТЕХНОЛОГІЇ

Інститут комп'ютерних технологій  
Національного авіаційного університету

*Наведено класифікацію джерел розсіюваної потужності і доведено, що для традиційних КМОН-технологій велику частку розсіюваної потужності, становить динамічна; подані основні методи, що дозволяють зменшити величину розсіюваної потужності при проектуванні КМОН ВІС*

### Постановка проблеми

Переважає більшість сучасних електронних пристроїв проектується із використанням технології КМОН (Комплементарний Метал Оксид Напівпровідник). Внаслідок швидкого прогресу в області технологій виробництва напівпровідникових інтегральних схем виникають нові завдання логічного синтезу обчислювальних пристроїв. Одним з найважливіших завдань є розробка методів проектування мікроелектронних цифрових пристроїв з низькою розсіюваною потужністю [1].

### Актуальність теми

Актуальність її визначається наступними основними факторами:

– наявністю портативних комп'ютерів, засобів навігації, засобів зв'язку, цифрової аудіо- і відеотехніки, які повинні сполучати високу надійність і необхідну швидкодію з низьким споживанням енергії для досягнення тривалості автономної роботи;

– необхідністю знижувати розсіювану потужність для рішення проблеми відводу тепла, бо це визначає масогабаритні показники пристроїв.

Реалізація всіх функціональних модулів електронних пристроїв за КМОН-технологією дозволила створювати на одному кристалі функціонально закінчені пристрої з високим ступенем інтеграції. Це значно збільшило функціональну насиченість кристала, знизило масогабаритні параметри кінцевого продукту, збіль-

шило його продуктивність і зменшило споживання енергії.

Енергоспоживання будь-якої НВІС залежить від багатьох параметрів, частина з яких задається як вхідні дані та не залежить від розробника НВІС. До таких параметрів можна віднести напругу живлення, технологію виготовлення, функціональний склад проектуємої НВІС. Енергоспоживання мікросхеми залежить від якості схемотехнічних рішень.

### Аналіз відомих досліджень

Основа КМОН-технології становить використання комплементарної пари польових (або уніполярних) транзисторів з індукованими каналами  $n$ - і  $p$ -типу. До складу КМОН-інвертора (рис. 1, а) входять два послідовно з'єднаних транзистори різних типів, затвори яких з'єднані паралельно і є входом. При поданні на вхід високої ( $+V_{dd}$ ) або низької напруги відкрито лише один з транзисторів. Опір стік-джерело закритого транзистора дуже великий, тому через інвертор протікає дуже малий статичний струм. Таким чином, основне споживання енергії відбувається лише в момент перемикання інвертора. На рис. 1, б подана структура цього КМОН-інвертора. Оскільки для формування  $p$ -канального МОН-транзистора потрібно створити «кишеню»  $n$ -типу, то при рівних геометричних розмірах  $p$ -канальний транзистор завжди має менший струм насичення, ніж  $n$ -канальний.

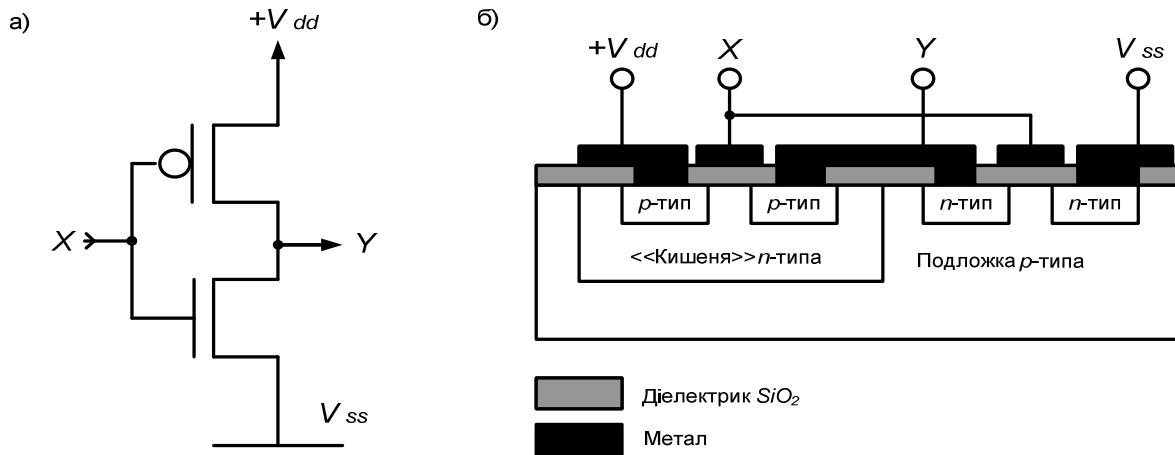


Рис. 1. Принципова схема КМОН-інвертора (а) та його структура (б)

Розсіювану потужність КМОН-схем можна розділити на два види – динамічну й статичну. Класифікація джерел розсіюваної потужності подана на рис. 2 [2].

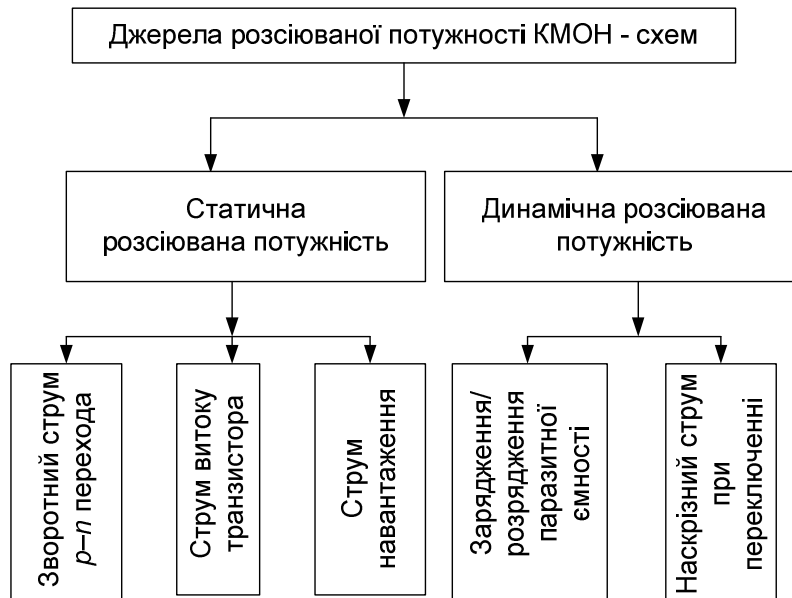


Рис. 2. Джерела розсіюваної потужності КМОН-схем

Динамічне розсіювання виникає в моменти перемикання схеми з одного логічного стану в інший та визначається двома основними джерелами – наскрізними струмами, які протікають через логічний елемент у момент перемикання, і струмами зарядження/розрядження паразитних ємностей логічних елементів. Основна причина наявності динамічного струму в КМОН схемах – це перезарядження внутрішніх ємностей НВІС, ве-

личина яких визначається розмірами топологічних елементів, що формуються в процесі створення транзисторів та між'єднань. Зарядження та розрядження ємностей відбувається через комутуємі  $n$ - та  $p$ -канальні транзистори, в яких є розсіювання споживаної динамічної енергії. Динамічна розсіювана потужність виникає в момент перемикання. Отже, чим вище перемикальна активність схеми, тим розсіювана потужність більша. При відсу-

тності перемикаць динамічна потужність дорівнює нулю.

Динамічні струми перезарядження ємностей на декілька порядків перевищують сумарні статичні струми витоків.

Статичне розсіювання визначається сумарними струмами витоків зачинених  $n$ - і  $p$ - канальних транзисторів в функціонально різних статичних станах та різних умовах роботи при зовнішніх впливах, які передбачені технічними вимогами та може бути оцінене та виміряне в моменти, коли схема знаходиться у стабільному стані. Для цифрових КМОН-схем вплив струмів в статичному стані можна враховувати не суттєво впливаючим на загальну споживану потужність [3].

Переважає більшість цифрових КМОН ВІС не потребує використання конденсаторів, вони в еквівалентній схемі КМОН-елемента утворюються за рахунок паразитних ємностей транзисторів і ліній зв'язку, тому паразитна ємність впливає як на час затримки поширення сигналу, так і на величину розсіюваної потужності.

Для оцінки величини розсіюваної потужності подамо інвертор на рис. 1, а у вигляді перемикаємої ємності  $C_L$ . Її зарядження і розрядження відбувається через резистори  $R_p$  та  $R_n$ , параметри яких визначаються опором відкритого каналу  $n$ -канального і  $p$ -канального транзисторів відповідно (рис. 3).

Перемикання елемента в стан логічної одиниці «1» відповідає заряду конденсатора  $C_L$  до рівня напруги  $V_{CL}(t)$ , а перемикання елемента в стан логічного нуля «0» відповідає розряду  $C_L$ . При заряді половина енергії, що надходить від джерела живлення, зберігається на конденсаторі  $C_L$ , а інша половина розсіюється у вигляді тепла на резисторі  $R_p$  [3]. При перемиканні інвертора в стан «0» енергія, збережена на конденсаторі, буде розсіяна на резисторі  $R_n$ . Таким чином,

$$E_n = E_p = 1/2 C_L V_{dd}^2. \quad (1)$$

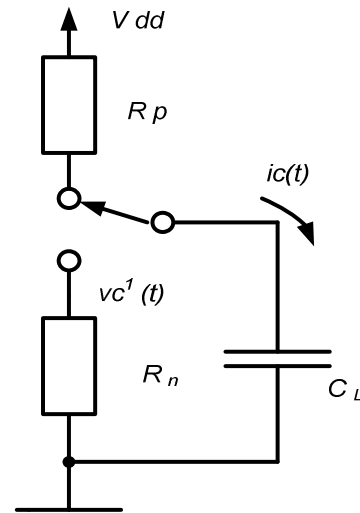


Рис. 3. Еквівалентна електрична схема інвертора

Якщо частота керуючого сигналу дорівнює  $f$ , то розсіювана потужність

$$P = 1/2 C_L V_{dd}^2 f. \quad (2)$$

Рівняння (2) можна використовувати для оцінки розсіюваної потужності цифрових КМОН-схем. При цьому ємність напруги  $C_L$  – постійна, напруга живлення  $V_{dd}^2$  – постійна, ємність встигає повністю зарядитися та розрядитися за період тактових імпульсів  $T=1/f$ .

Для КМОН-мікросхеми, яка складається з  $N$  транзисторів, формулу (2) можна подати у наступній формі:

$$P = V_{dd}^2 f \sum C_i, \quad (3)$$

де  $C_i$  – середнє значення ємності, яка перезаряджується при перемиканні  $i$ -того транзистора.

В реальних НВІС середня частота перемикання транзисторів в різних функціональних вузлах та блоках може бути в десятки разів менше тактової частоти  $f$ . Враховуючи це формула (3) буде мати вигляд:

$$P = C_{total} V_{dd}^2 f, \quad (4)$$

де значення  $f$  та  $V_{dd}$  постійні, а  $C_{total}$  являє собою ефективне значення середньої ємності, перемикаємої за один період тактових імпульсів, яка залежить від кількості транзисторів в схемі, середньої ємності, перезаряджаємої кожним транзистором, та середньої кількості перемикачів транзисторів при виконанні задачі.

Для оцінки значення  $C_{total}$  можна використовувати наступний вираз:

$$C_{total} = C_{сеп} N_{транз} K_{эф}, \quad (5)$$

де  $C_{сеп}$  – середня ємність, яка перезаряджається при перемиканні одного транзистора, яка залежить від технології виготовлення НВІС;  $N_{транз}$  – кількість транзисторів в схемі, яка залежить від функціональної складності схеми;  $K_{эф}$  – коефіцієнт, який залежить від схемотехнічних рішень, та показує во скільки разів середня частота перемикання транзисторів в НВІС менше тактової частоти  $f$ .

Для обчислення параметра  $C_{сеп}$  введемо формулу:

$$C_{сеп} = C_0 K_{техн}, \quad (6)$$

де  $C_0$  – середня ємність, перезаряджаєма транзистором в НВІС, яка реалізована по базовій технології;  $K_{техн}$  – коефіцієнт впливу технології, який показує, наскільки середня перезаряджаєма ємність в НВІС, яка досліджується, виготовленої за деякою технологією, відрізняється від ємності  $C_0$  отриманої базової технології.

Другим джерелом динамічної розсіюваної потужності КМОН-схем є наскрізний струм скрізь логічний елемент при його перемиканні  $i_c(t)$ .

Відзначимо особливості наскрізного струму:

1) наскрізний струм протікає лише в момент часу  $t$ , коли вхідна напруга  $V_{in} > V_{in}$  й  $V_{in} < V_{tp}$ , де  $V_{in}$  і  $V_{tp}$  відповідно граничні напруги  $n$ - і  $p$ -каналних транзисторів. Отже, чим менше різниця між цими значеннями, тим менше наскрізний струм.

2) величина наскрізного струму

обернено пропорційна ємності навантаження  $C_L$ . При відсутності ємності значення струму максимальне, при зростанні ємності навантаження струм зменшується.

3) величина наскрізного струму прямо пропорційна тривалості фронтів вхідного сигналу.

Для спрощення розрахунків наскрізний струм будемо враховувати у вигляді додаткової ємності  $C_{SC}$ , що розміщується паралельно  $C_L$ . Значення цієї ємності може бути знайдене з виразу:

$$C_{SC} = \frac{t_{SC} I_{peak}}{V_{dd}}, \quad (7)$$

де  $I_{peak}$  – струм насичення транзисторів;  $t_{SC}$  – час протікання наскрізного струму.

Розсіювана потужність КМОН-схеми внаслідок протікання наскрізного струму, може становити від 10 до 60% від загальної динамічної потужності. Її величина залежить від таких параметрів, як вольт-амперні характеристики транзисторів, тривалості переднього та заднього фронтів вхідного сигналу, ємності навантаження, напруги живлення й т.п.

Статична потужність у КМОН ВІС розсіюється тоді, коли логічний елемент перебуває в деякому фіксованому стані («0» або «1»), та її величина визначається значенням струмів витoku каналу МОН-транзистора, зворотних струмів  $p$ - й  $n$ -переходів і навантажувальними струмами (рис. 4).

В ідеальному випадку в статичному стані КМОН-елемент не споживає потужність, тобто струм крізь нього не протікає.

На рис. 4, а подано напрямок протікання струму через закритий канал транзистора. Він експоненційно залежить від величини межевої напруги й лінійно залежить від рівня вхідного сигналу, геометричних розмірів транзисторів і топології схеми, температури та технології, яка використовується.

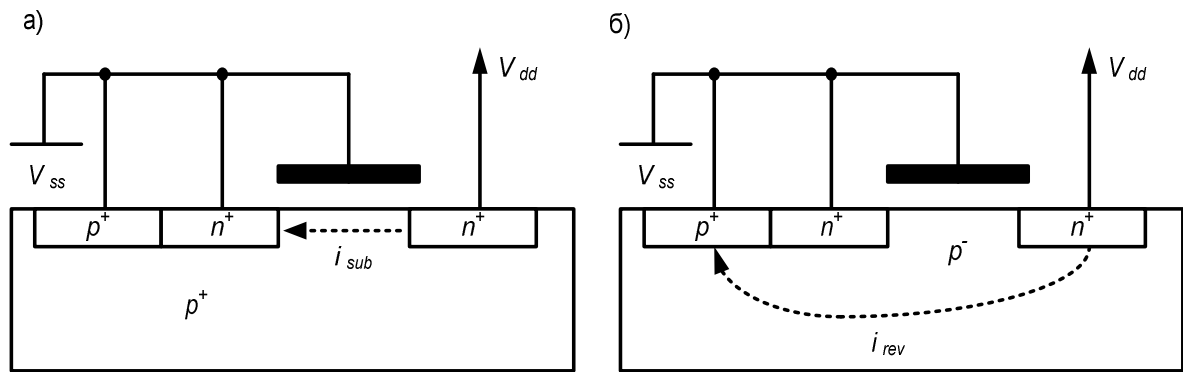


Рис. 4. Струми витоку КМОН-схем:  
 а – струм витоку каналу  $i_{sub}$  ; б – зворотний струм  $p-n$ -перехода  $i_{rev}$

Другим джерелом струму витоку є зворотний струм  $p-n$ -переходів, які формуються між різними частинами КМОН-інтегральної схеми (рис. 4, б). Величина зворотного струму залежить від технології виготовлення, площі  $p-n$ -переходу, температури й напруги зсуву та становить, як правило, пікоампери.

Оскільки сумарне значення струмів витоку в  $10^5 - 10^6$  разів менше, ніж динамічних струмів, у розрахунках, як правило, не враховують. У тих випадках, коли необхідно врахувати розсіювану потужність, внаслідок струмів витоку, можна використати наступний вираз:

$$P_{leak} = V_{dd} N K_d I_{leak}, \quad (8)$$

де  $N$  – кількість транзисторів;  $K_d$  – емпіричний коефіцієнт, що враховує особливі технології, що застосовуються;  $I_{leak}$  – сумарний струм витоку одного транзистора.

У деяких випадках, таких як схеми з відчиненим стоком, елементи «монтажне АБО» або резистивне навантаження виходів схеми, КМОН-схема може споживати струм й у статичному режимі. Тоді величина струму й, відповідно, розсіювана потужність залежать від логічного стану та опору навантаження.

У загальному випадку розсіювана потужність внаслідок протікання постійного струму, визначається виразом

$$P_{stat} = V_{dd} I_{stat}. \quad (9)$$

### Зменшення розсіюваної потужності

Не існує універсального рішення, що можна застосувати у всіх можливих ситуаціях. Тому необхідно враховувати особливості пристрою, що проектується: швидкодію, витрати на реалізацію, надійність, ремонтпридатність і т.п. для вибору методів і засобів мінімізації споживання енергії.

Розглянемо основні підходи, які застосовуються комплексно або окремо для зменшення споживання енергії при проектуванні КМОН БІС. На рис. 5 подана узагальнена класифікація основних методів мінімізації енергоспоживання, що використовуються.

При традиційних КМОН-технологіях основну частку розсіюємої потужності становить динамічна потужність, що визначається виразом (2). Зниження будь-якого параметра – напруги живлення, напруги перемикання, що перезаряджає ємності або частоти перемикання – приводить до зниження величини розсіюваної потужності.

Традиційно найбільша увага була спрямована на зниження величини напруги живлення. Між динамічною розсіюваною потужністю і напругою живлення ВІС існує квадратична залежність. Крім того, при зменшенні напруги живлення одночасно зменшується й статична потужність.

Час затримки поширення сигналу  $t_d$  через МОН-транзистор визначається виразом:

$$t_d = \frac{C_L \cdot V_{dd}}{(V_{dd} - V_{th})^\alpha}, \quad (10)$$

де  $V_{th}$  – гранична напруга,  $\alpha$  – емпірична константа.

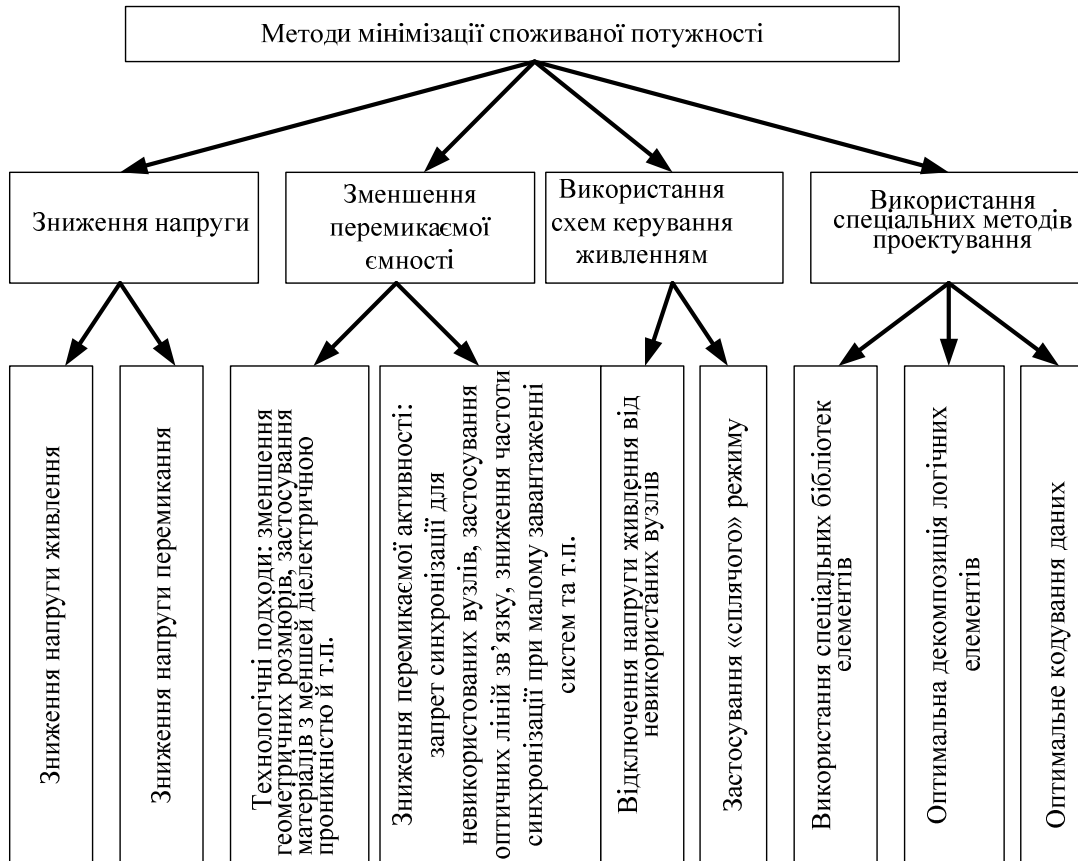


Рис. 5. Класифікація основних методів мінімізації споживаної потужності при проектуванні КМОН ВІС

### Висновки

Зменшення напруги живлення при збереженні граничної напруги на постійному рівні приводить до зростання часу перемикання транзистора, що негативно відбивається на швидкодії схеми, але зменшення граничної напруги приводить до значного зростання струмів витоку каналу. Максимальне зниження загальної розсіюваної потужності спостерігається в тому випадку, коли потужність, обумовлена струмами витоку, має той же порядок, що й динамічна потужність.

Наступним несприятливим наслідком зменшення напруги живлення є зниження завадостійкості, тому що зменшу-

ється різниця між логічними рівнями. Крім того, зміна логічних рівнів вимагає застосування спеціальних перетворювачів рівнів напруги для стикування виходів НВІС з елементами стандартної логіки. Альтернативним підходом є зниження перемикаємої напруги. Тобто зарядження/розрядження конденсатора відбувається не на величину напруги живлення  $V_{dd}$ , а на деяку його частину, наприклад, від  $1/3$  до  $2/3$   $V_{dd}$ . При цьому не губиться швидкодія, завадостійкість зменшується через зменшення різниці в логічних рівнях. Однак на відміну від попереднього підходу, розсіювана потужність внаслідок

протікання статичного струму, не зменшується.

Як відзначено вище, для роботи цифрових КМОН-схем конденсатори не потрібні, однак вони формуються в сучасних ВІС за рахунок паразитних ємностей  $p-n$ -переходів, паразитних ємностей ліній зв'язку й т.п. Позбутися від цих ємностей неможливо, тому при проектуванні НВІС необхідно враховувати й мінімізувати їхні величини. При цьому необхідно використати різні підходи: зменшення геометричних розмірів елементів, зменшення довжини ліній зв'язку, оптимізація розміщення компонентів і ліній зв'язку, застосування нових матеріалів і технологій виготовлення й т.п. Крім того, для мінімізації величини наскрізного струму, що враховується у вигляді додаткової ємності  $C_{SC}$  на підставі (3), необхідно використати швидкодіючі транзистори, які працюють на мінімально можливій частоті. Це дозволяє зменшити наскрізний струм.

Наступним фактором, що впливає на величину динамічної потужності, є частота перемикавання, тому її зниження також буде приводити до зниження розсіюваної потужності. Однак при цьому виникає конфлікт із вимогами, що стосуються продуктивності. Для усунення цього конфлікту можна використати різні підходи. По-перше, при проектуванні нових пристроїв пріоритет повинен віддаватися рішенням зі зниженими вимогами до робочої частоти функціональних компонентів. По-друге, для зниження тактової частоти необхідно застосовувати методи паралельного виконання операцій на конвеєрі. По-третє, доцільно використати різні схеми заборони синхронізації як для невикористовуваних функціональних модулів, так і для модулів, інформація в яких не змінюється в цей момент.

При проектуванні цифрових пристроїв з мінімальним споживанням енергії як оцінку зазвичай використовують добуток перемикаємої ємності і частоти перемикавання – перемикальну активність. Для мінімізації цього параметру існує декілька рішень. По-перше, для вузлів з вели-

кою ємністю необхідно мінімізувати частоту перемикавання. Для вузлів з високою частотою перемикавання треба мінімізувати перемикальну ємність. По-друге, можна застосовувати еквівалентні перетворення схеми для мінімізації перемикальної активності. По-третє, використовують спеціальні методи кодування даних, які дозволяють мінімізувати перемикальну активність при роботі схеми.

Можливість збільшення продуктивності КМОН-мікропроцесорів істотно обмежує ланцюг синхронізації. Імпульси синхронізації повинні одночасно надходити на всі вузли цифрового пристрою. Однак на кристалі ВІС лінії синхронізації мають більшу довжину й, як наслідок, більший опір й ємність. Тому висока частота роботи, великий опір і більша ємність ліній зв'язку приводять до того, що в ланцюгах синхронізації сучасних ВІС іноді розсіюється до 50% від загальної потужності. Одне з рішень – заміна металевих провідників оптичними лініями передачі тактових імпульсів на кристалі.

Подальше вдосконалювання технології виробництва НВІС і зменшення геометричних розмірів елементів приводить до зміни впливу різних джерел на сумарне значення розсіюваної потужності.

#### Список літератури

1. Roy K., Prasad S.C. Low power CMOS VLSI circuit design. – New York: John Wiley and Sons, Inc., 2000.
2. Мурашко И.А. Методы минимизации энергопотребления при самотестировании цифровых устройств: Монография / И. А. Мурашко, В. Н. Ярмолик. – Минск: Бестпринт, 2004. – 198 с.
3. Yeap G.P. Practical low power digital VLSI design, Kluwer Academic Publisher, 1998.
4. Белоус А.И., Мурашко И.А., Сякерский В.С. Методы минимизации энергопотребления при проектировании КМОП БИС. – С. 39–44.