

УДК 621.382.049.77:620.179.14

Тлустий А. О. ORCID: 0000-0002-4777-9563 (ВІТІ ім. Героїв Крут)  
д-р техн. наук, професор Кузавков В. В. ORCID: 0000-0002-0655-9759 (ВІТІ ім. Героїв Крут)

## ДІАГНОСТИЧНА МОДЕЛЬ ВИХІДНОГО ТРАНСЛЯТОРА КМОН ІНТЕГРАЛЬНОЇ МІКРОСХЕМИ

У цій статті розглядається актуальна науково-технічна задача забезпечення надійності функціонування сучасних зразків радіоелектронного озброєння шляхом удосконалення методів технічного діагностування їхньої елементної бази. Актуальність дослідження зумовлена стрімким переходом військової техніки на використання інтегральних мікросхем із високим ступенем інтеграції, що вимагає розробки неруйнівних та безконтактних способів контролю їхнього фактичного стану. Основна увага приділена розробці діагностичної моделі вихідного транслятора комплементарного метало-оксид-напівпровідника, яка адаптована для застосування у складі безконтактного індукційного методу діагностування. Проблема роботи полягає у тому, що традиційні підходи до оцінки технічного стану часто ігнорують специфічні фізичні процеси деградації, притаманні саме структурам комплементарних метало-оксид-напівпровідників, що призводить до недостовірних прогнозів залишкового ресурсу.

В основу запропонованого рішення покладено розвиток існуючих моделей для транзисторно-транзисторної логіки з їх докорінною модернізацією під фізику напівпровідникових процесів сучасних мікросхем. Наукова новизна отриманих результатів полягає у детальному врахуванні таких деградаційних чинників, як захоплення електричного заряду в підзатворному діелектрику, ін'єкція гарячих носіїв та негативна нестабільність порогової напруги. У процесі дослідження було аналітично встановлено стійкий математичний зв'язок між зміною вихідних струмів  $I^0$ ,  $I^1$  транслятора у логічних станах нуля та одиниці та сумарною деградацією порогової напруги транзисторів  $\Delta V_{th}(t)$ . Це дозволило отримати універсальну розрахункову формулу для визначення індивідуального залишкового ресурсу компонента, що є ключовим показником для систем прогностичного технічного обслуговування.

Запропонована модель дозволяє не лише констатувати факт наявності несправності, а й здійснювати глибоку локалізацію дефектів і прогнозувати подальшу працездатність радіоелектронного озброєння в умовах інтенсивної експлуатації. Практична значущість роботи підтверджується можливістю інтеграції розробленої моделі в автоматизовані системи діагностування, що забезпечить суттєве підвищення боєготовності підрозділів завдяки попередженню раптових відмов критично важливих електронних модулів. Таким чином, результати дослідження створюють підґрунтя для переходу до обслуговування військової техніки за її фактичним технічним станом, мінімізуючи ризики виходу з ладу систем зв'язку та управління.

**Ключові слова:** діагностична модель, комплементарний метало-оксид-напівпровідник, КМОН, вихідний транслятор, безконтактний індукційний метод, радіоелектронне озброєння, порогова напруга, ін'єкція гарячих носіїв, негативна нестабільність порогової напруги, залишковий ресурс, технічний стан.

### **A. Tlustyi, V. Kuzavkov. Diagnostic model of the CMOS integrated circuit output translator**

This article addresses the relevant scientific and technical problem of ensuring the operational reliability of modern electronic warfare and weapons systems by improving the methods for technical diagnostics of their component base. The relevance of the study is driven by the rapid transition of military equipment to the use of high-density integrated circuits, which necessitates the development of non-destructive and non-contact methods for monitoring their actual condition. The main focus is placed on the development of a diagnostic model for a complementary metal-oxide-semiconductor output translator, adapted for use within a non-contact induction diagnostic method. The problem addressed in this work lies in the fact that traditional approaches to technical state assessment often ignore specific physical degradation processes inherent to structures, leading to unreliable remaining useful life predictions. The proposed solution is based on the advancement of existing models for transistor-transistor logic, with their fundamental modernization to align with the physics of semiconductor processes in modern integrated circuits. The scientific novelty of the results consists in the detailed consideration of such degradation factors as charge trapping in the gate dielectric, hot carrier injection, and negative bias temperature instability. During the study, a stable mathematical relationship was analytically established between the changes in the translator output currents  $I^0$ ,  $I^1$  in logical zero and one states and the total degradation of the transistor threshold voltage  $\Delta V_{th}(t)$ . This enabled the derivation of a universal calculation formula for determining the individual remaining useful life of the component ( $t^*$ ), which is a key indicator for predictive maintenance systems. The proposed model allows not only for the detection of a fault but also for deep defect localization and forecasting the future operability of electronic equipment under intensive operational conditions. The practical significance of the work is confirmed by the possibility of integrating the developed model into automated diagnostic systems, which will significantly increase the combat readiness of units by preventing

sudden failures of critical electronic modules. Thus, the research results provide a foundation for transitioning to condition-based maintenance of military equipment, minimizing the risks of failure in communication and control systems.

**Keywords:** diagnostic model, complementary metal-oxide-semiconductor, CMOS, output translator, non-contact induction method, electronic equipment, threshold voltage, hot carrier injection, negative bias temperature instability (NBTI), remaining useful life, technical state.

### Постановка задачі

Відомо, що сучасні об'єкти радіоелектронного озброєння (РЕО) є складними технічними системами, що об'єднують модулі різного призначення. Проведення якісного діагностування цифрових блоків РЕО залежить від адекватності діагностичної моделі об'єкта контролю, методу діагностування і методики його проведення [1–4].

Структурною частиною об'єктів РЕО є цифрові блоки, до складу яких входять напівпровідникові радіоелектронні компоненти. Сучасна цифрова схемотехніка базується переважно на комплементарних метало-оксид-напівпровідникових (КМОН) логічних структурах, що витіснили транзисторно-транзисторну логіку (ТТЛ) у більшості застосувань. Відповідно, виникає потреба у діагностичних моделях саме для КМОН інтегральних мікросхем (ІМС).

У роботі [5] розроблено діагностичну модель вихідного транслятора ТТЛ ІМС на біполярних транзисторах для безконтактного індукційного методу діагностування. Показано, що основним носієм діагностичної інформації є емітерний струм вихідного транслятора  $I^0$  та  $I^1$ , що вимірюється в одній контрольній точці. Математична модель пов'язує струм транслятора зі зміною концентрації основних носіїв заряду  $n(D, t)$  в біполярній напівпровідниковій структурі під час експлуатації.

Розвитком підходу є розробка аналогічної діагностичної моделі для КМОН ІМС [5]. Принципова відмінність полягає у механізмі формування діагностичного параметра: у ТТЛ ІМС він визначається зміною концентрації носіїв  $n(D, t)$ ; у КМОН ІМС – деградацією порогової напруги МОН-транзистора  $\Delta V_{th}(t)$  внаслідок трьох специфічних механізмів (oxide trapping, HCI, NBTI). Спільним є принцип безконтактної реєстрації струму в одній точці.

Порівняння двох діагностичних моделей наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняння діагностичних моделей трансляторів ТТЛ та КМОН ІМС

Характеристика	ТТЛ ІМС [5]	КМОН ІМС (ця робота)
Тип логіки	ТТЛ (транзисторно-транзисторна)	КМОН (комплементарна МОН)
Активні елементи вихідного транслятора	Біполярні транзистори $VT2, VT3$	МОН-транзистори $M_3$ (pMOS), $M_4$ (nMOS)
Механізм деградації	Зміна концентрації носіїв $n(D, t)$	Деградація порогової напруги $\Delta V_{th}(t)$ : oxide trapping + HCI + NBTI
Математичний апарат	Рівняння дифузії (гіперболічні функції $cth, csch$ )	Степеневі закони деградації (oxide trapping, HCI, NBTI)
Вплив старіння на струм	Зміна рухливості $\mu$ і концентрації $n$	Зміна $(V_{GS} - V_{th})^2$
Діагностичний параметр	$I^0 = f(n_1, n_2, t)$ ; $I^1 = f(n_1, n_2, t)$	$I^0 = f(\Delta V_{th}(t))$ ; $I^1 = f(\Delta V_{th}(t))$
Метод вимірювання	Безконтактний індукційний — одна контрольна точка	
Прогнозування ресурсу	$n(D, t) \rightarrow$ гранична концентрація	$\Delta V_{th}(t) \rightarrow$ формула: $t^*$ (рівн. 14)

Фізична паралель між двома моделями полягає у тому, що обидві описують деградацію напівпровідникової структури степеневим законом відносно часу. У моделі ТТЛ – це концентрація носіїв  $n(D, t)$ , що входить до рівняння (13) через параметри ефективної маси  $m^*$  та енергії активації  $E_a$  [5]. У моделі КМОН – це деградація порогової напруги  $\Delta V_{th}(t)$  (рівняння (13) у роботі). Показник степеня  $n \approx 0,1 - 0,3$  є характерним для обох моделей, що відображає субдифузійний характер накопичення деградації.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Безконтактний індукційний метод діагностування РЕО розроблено у роботах [1–4]. Метод базується на реєстрації електромагнітного поля струмів у шині живлення без розмикання електричних кіл об'єкта контролю.

Діагностичну модель вихідного транслятора ТТЛ ІМС розроблено у [5]. Доведено, що основним носієм діагностичної інформації є струм вихідного транслятора. Встановлено зв'язок між струмом транслятора і концентрацією основних носіїв заряду  $n(D, t)$ , що змінюється в процесі старіння напівпровідникової структури.

Механізми деградації МОН-транзисторів досліджено у низці фундаментальних робіт. Захоплення заряду в підзатворному діелектрику (oxide trapping) описано у [6; 7]. Механізм ін'єкції гарячих носіїв (HCI) та його вплив на порогову напругу розглянуто у [8]. Реакційно-дифузійна модель NBTI деградації  $p$ -MOSFET розроблена у [9]. Деградація рухливості носіїв унаслідок розсіювання на захоплених зарядах описана у [10].

Авторам не відомі публікації, де б діагностична модель КМОН ІМС для безконтактного індукційного методу діагностування була побудована з урахуванням сумісної дії трьох механізмів деградації МОН-транзистора та пов'язана з формулою залишкового ресурсу. Це визначає наукову новизну цієї роботи.

**Метою роботи** є розробка діагностичної моделі вихідного транслятора КМОН ІМС як розвитку моделі [5] на клас КМОН пристроїв – для безконтактного індукційного методу діагностування РЕО.

#### **Виклад основного матеріалу**

Модель повинна пов'язувати струм вихідного транслятора  $I^0$  та  $I^1$  з фізико-хімічними процесами деградації МОН-транзисторів (oxide trapping, HCI, NBTI) та забезпечувати можливість прогнозування залишкового ресурсу компонента.

Для досягнення мети вирішуються низка завдань:

аналіз фізичних механізмів деградації МОН-транзисторів у складі КМОН ІМС;

розробка математичної моделі деградації порогової напруги  $\Delta V_{th}(t)$  з урахуванням трьох механізмів;

отримання аналітичних виразів для діагностичних параметрів  $I^0$  та  $I^1$  як функцій  $\Delta V_{th}(t)$ ;

розробка критерію граничного стану та формули залишкового ресурсу  $t^*$ ;

визначення практичної методики ідентифікації параметрів моделі за результатами безконтактних вимірювань.

Базовим логічним елементом вихідних трансляторів КМОН ІМС є комплементарна пара МОН-транзисторів – структура інвертора (рис. 1). Схема складається з вхідного каскаду, вихідного каскаду (комплементарна пара) та буферних елементів керування. Транзистор  $M_3$  ( $p$ -каналний MOSFET) і транзистор  $M_4$  ( $n$ -каналний MOSFET) забезпечують формування сигналів керування для протифазного перемикавання вихідних станів.

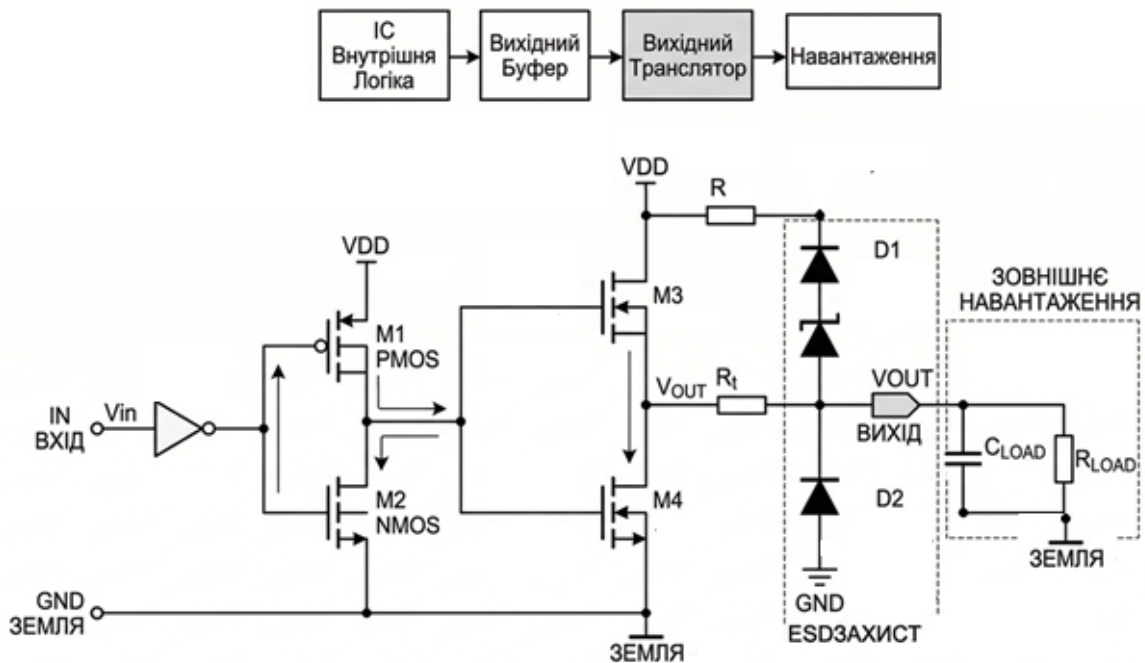


Рис. 1. Спрощена схема вихідного транслятора КМОП ІМС (розроблено авторами на основі [11])

На рисунку 1 показана архітектура вихідного транслятора КМОП ІМС. Вхідний сигнал через буферний інвертор ( $M_1$ ,  $M_2$ ) керує комплементарною парою вихідних транзисторів  $M_3$  (pMOS) і  $M_4$  (nMOS). При логічному “0” на вході відкривається  $M_3$  і вихід підтягується до VDD через  $M_3$ ; при логічному “1” відкривається  $M_4$  і вихід підключається до GND через  $M_4$ . Схему ESD-захисту відображено діодами  $D1$  і  $D2$ .

Доведено, що основним джерелом діагностичної інформації про стан цифрової ІМС є вихідний транслятор – зіставний транзистор. Тому, необхідно визначення параметрів базового логічного елементу з урахуванням процесів, які відбуваються в ньому під час експлуатації (старіння напівпровідникової структури), а саме зміну електрофізичних і фізико-хімічних властивостей напівпровідникової структури. Саме через струм вихідного транслятора ( $I^0$  (стан “0”) або  $I^1$  (стан “1”)) здійснюється реєстрація діагностичного параметра безконтактним індукційним методом.

Слід зауважити, що зміна форми сигналу через вихідний транслятор (форми струму) обумовлена наявністю струмів квазікороткого замикання під час зміни стану з “0” на “1” та навпаки. Безконтактний індукційний датчик розташований на шині живлення в безпосередній близькості до мікросхеми і не фіксує постійну складову струму (силу струму). Цей датчик фіксує виключно сплески струму (різку зміну амплітудного значення). Саме форма й амплітуда є діагностичною ознакою фактичного стану силової частини мікросхеми – вихідного транслятору.

Еквівалентна схема вихідного транслятора представлена на рисунку 2. Резистор  $R_{ch}$  моделює опір каналу МОН-транзистора у відкритому стані,  $C_{ox}$  – ємність підзатворного діелектрика,  $R_{sub}$  – опір підкладки.

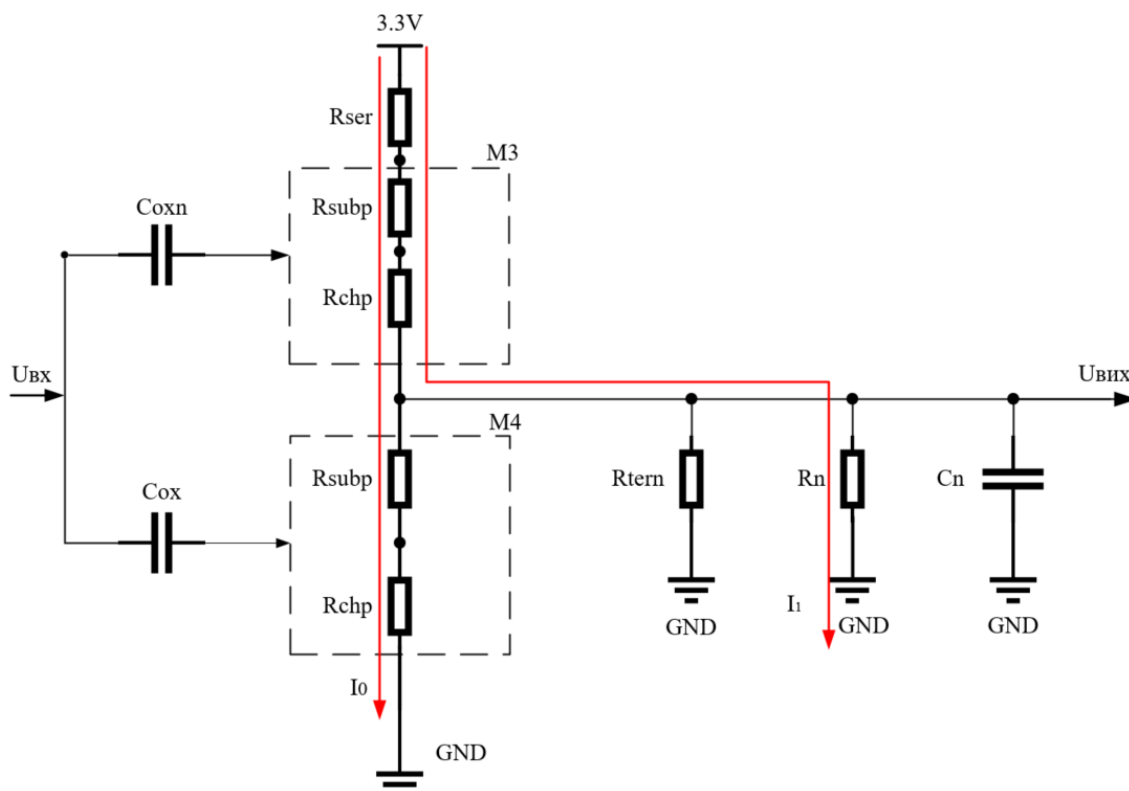


Рис. 2. Еквівалентна схема вихідного транслятора логічного елементу КМОН

На рисунку 2 елемент  $C_{ox}$  – не окремий елемент, а фізична ємність самого затвору, питома ємність підзатворного діелектрика, що визначає як керування транзистором, так і механізм деградації *oxide trapping* ( $C_{ox} = \epsilon_{ox} / t_{ox}$ ).

Резистор  $R_{ser}$  обмежує струм у вихідному каскаді під час переходу схеми з одного стану в інший, коли транзистор  $M_3$  ще перебуває в режимі насичення, а транзистор  $M_4$  вже відкрився. Перехідні процеси, які відбуваються при перемиканні вихідного каскаду (транслятора) є найбільш інформативними при застосуванні індукційного методу.

Неповне закриття (відкриття) транзисторів (перехідні процеси) спричиняють виникнення імпульсів струму квазікороткого замикання. Тривалість зазначених імпульсів становить 0,5–5 нс.

Фільтри в ланцюгах живлення не в змозі повністю згладжувати перешкоди від імпульсів такої тривалості. Реєстрація сигналу в шині живлення (датчик діагностичного сигналу) та обробка (автоматична система діагностування) дозволяють створити базу сигнатур об'єкта контролю під впливом перевіркою тестової послідовності.

Математична модель транслятору ІМС дозволяє визначити стан об'єкта контролю в стаціонарному режимі (вихідне значення логічний "0" або логічна "1"). Отримані значення відображують стан напівпровідникової структури на момент часу перевірки, тобто враховано час існування напівпровідника (фізико-хімічні процеси в напівпровідниковій структурі).

Механізми деградації МОН-транзисторів.

Розглянемо три основні механізми деградації, що визначають зміну параметрів МОН-транзисторів під час експлуатації.

Захоплення заряду в підзатворному діелектрику (*oxide trapping*). Під дією електричного поля у підзатворному діоксиді кремнію відбувається накопичення захопленого заряду  $Q_{ox}$ , що призводить до зміщення порогової напруги згідно з виразом (1):

$$\Delta V_{th}(ox)(t) = -Q_{ox}(t) / C_{ox} = -q N_{ot}(t) / C_{ox}, \quad (1)$$

де  $q$  – заряд електрона;

$N_{ot}(t)$  – концентрація захопленого заряду в діелектрику;

$C_{ox}$  – питома ємність підзатворного діелектрика товщиною  $tox$ .

Кінетика накопичення захопленого заряду описується степеневим законом (2) [7]:

$$N_{ot}(t) = N_{ot0} (t / t_0)^n, \quad (2)$$

де  $N_{ot0}$  – початкова концентрація;

$n \approx 0,1 - 0,3$  – показник степеня, що залежить від технологічного процесу.

Ін'єкція гарячих носіїв (HCI). Під час роботи транзистора в режимі насичення електрони (для  $n$ -MOSFET) набувають достатньої енергії для подолання потенціального бар'єра  $Si/SiO_2$  і захоплюються в діелектрику поблизу стоку.

Зміщення порогової напруги внаслідок HCI розраховується за формулою (3):

$$\Delta V_{th}(HCI)(t) = A(HCI) (I_{sub}b/W)^m t^n \exp(-Ea(HCI)/kT), \quad (3)$$

де  $I_{sub}b$  – струм підкладки як індикатор генерації гарячих носіїв;

$W$  – ширина каналу;

$A, m, n$  – технологічні константи;

$Ea(HCI)$  – енергія активації;

$k$  – стала Больцмана;

$T$  – абсолютна температура [8].

Негативна нестабільність порогової напруги (NBTI). Механізм NBTI є специфічним для  $p$ -MOSFET і проявляється при від'ємному зміщенні затвору за підвищеної температури. Генерація інтерфейсних пасток  $Nit$  на межі  $Si/SiO_2$  описується реакційно-дифузійною моделлю виразів (4) та (5) [9]:

$$\Delta V_{th}(NBTI)(t) = -q \Delta Nit(t) / C_{ox}, \quad (4)$$

$$\Delta Nit(t) = \sqrt{(k_i N_0 / k_r)} (DH t / \pi)^{1/4}, \quad (5)$$

де  $k_i, k_r$  – константи швидкості прямої та зворотної реакції розриву зв'язків  $Si-H$ ;

$N_0$  – початкова концентрація зв'язків;

$DH$  – коефіцієнт дифузії атомарного водню.

Сумарна деградація порогової напруги МОН-транзистора з урахуванням усіх трьох механізмів представлена виразом (6):

$$\Delta V_{th}t) = \Delta V_{th}(ox)(t) + \Delta V_{th}(HCI)(t) + \Delta V_{th}(NBTI)(t). \quad (6)$$

Рівняння (6) є першим наближенням, що передбачає незалежність трьох механізмів деградації. У реальних умовах механізми взаємодіють: спільна дія HCI та NBTI, що в свою чергу може призводити до нададитивного збільшення  $|\Delta V_{th}|$  порівняно з лінійною суперпозицією [12]. Тому рівняння (6) дає консервативну (занижену) оцінку сумарної деградації, що відповідає принципу запасу при прогнозуванні залишкового ресурсу.

Математична модель струму через вихідний транслятор.

Струм через  $n$ -MOSFET у режимі насичення визначається квадратичним законом, що описує вираз (7):

$$I_{Ds} = (\mu_n C_{ox} W) / (2L) (V_{Gs} - \Delta V_{th})^2 (1 + \lambda \cdot V_{Ds}), \quad (7)$$

де  $\mu_n$  – рухливість електронів у каналі;

$W/L$  – відношення ширини до довжини каналу;

$\lambda$  – параметр модуляції довжини каналу.

З урахуванням деградації порогової напруги (6) рухливість носіїв також деградує з часом внаслідок розсіювання на захоплених зарядах, представлених виразом (8) [10]:

$$\mu_n(t) = \mu_{n0} / (1 + \theta \Delta V_{th}(t)), \quad (8)$$

де  $\mu_{n0}$  – початкова рухливість;

$\theta$  – коефіцієнт деградації рухливості.

Струм реєстрації в місці контролю (стан логічного “0”,  $V_{вих}^0$ ) відповідно до співвідношення (9):

$$I^0 = (\mu_n(t) C_{ox} W) / (2L) [V_{DD} - \Delta V_{th}]^2 / (1 + \lambda \cdot V_{Ds}) + V_{вих}^0 / R_n, \quad (9)$$

де  $V_{th}(t)$  – поточне значення порогової напруги з урахуванням деградації  $V_{th}(t) = \Delta V_{th0} + \Delta V_{th}(t)$ ;

$V_{th0}$  – початкове значення порогової напруги;

$V_{вих}^0$  – напруга на виході транслятора у стані логічного «0»;

$R_n$  – навантаження.

Струм реєстрації в стані логічної “1” ( $V_{вих}^1$ ) визначається через транзистор  $p$ -MOSFET, фізична природа процесу формалізована виразом (10):

$$I^1 = (\mu_p(t) C_{ox} W) / (2L) [V_{DD} - |\Delta V_{thp}(t)|]^2 + (V_{DD} - V_{вих}^1) / R_p, \quad (10)$$

де  $\mu_p(t)$  – рухливість дірок з урахуванням NBTI-деградації  $p$ -MOSFET;

$\Delta V_{thp}(t)$  – порогова напруга  $p$ -MOSFET.

Отримана таким чином система рівнянь (9), (10) з урахуванням (1)–(8) є діагностичною моделлю вихідного транслятора КМОН ІМС для вдосконаленого індукційного методу діагностування РЕО і може бути використана для отримання розрахункових значень діагностичного параметра при вирішенні основних задач технічного діагностування: визначення фактичного технічного стану, локалізації несправності та прогнозування технічного стану, що зображено на рисунку 3.

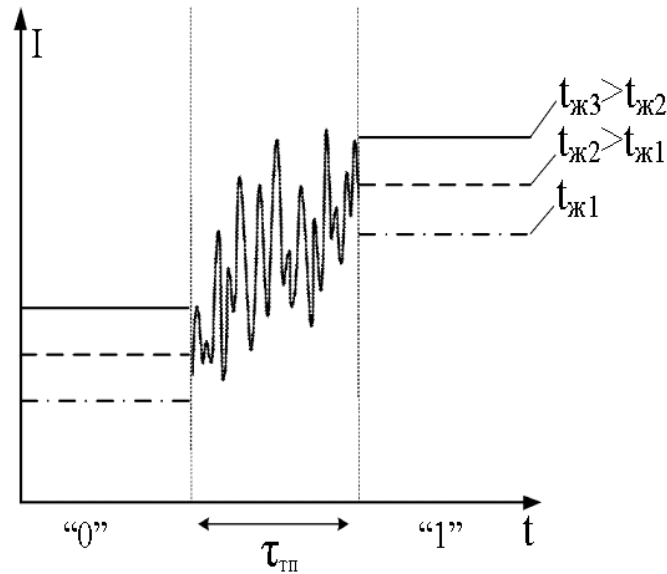


Рис. 3. Характерні зміни струму через вихідний транслятор КМОН ІМС

Прогнозування технічного стану КМОН ІМС на основі діагностичної моделі.

Запропонована діагностична модель дозволяє не лише визначити поточний технічний стан КМОН ІМС, але й прогнозувати залишковий ресурс компонента. Фізичною основою прогнозування є монотонний характер деградації порогової напруги  $\Delta V_{th}(t)$  – усі три механізми деградації (oxide trapping, HCI, NBTI) призводять до односпрямованого збільшення  $|V_{th}|$  з часом, що відповідно зменшує струм через вихідний транслятор.

Критерій граничного стану КМОН ІМС визначається через допустиме зменшення струму вихідного транслятора відносно початкового значення, кількісна оцінка якого проводиться на підставі залежності (11):

$$I(t) = (I_0^0 - I_0(t)) / I_0^0 \leq \Delta I_{dox}, \quad (11)$$

де  $I_0^0$  – початкове значення струму реєстрації (стан логічного «0»);

$I_0(t)$  – поточне значення;

$\Delta I_{dox}$  – допустима відносна деградація струму, що визначається з умови забезпечення коректної роботи логічного елемента (типове значення  $\Delta I_{dox} = 0,15-0,20$ ).

Підставляючи вирази (1)–(8) у (9), отримаємо залежність струму від часу, взаємозв'язок параметрів у якому описується виразом (12):

$$I_0(t) = (\mu_{n0} C_{ox} W) / (2L(1 + \theta \Delta V_{th}(t))) [V_{DD} \Delta V_{th0} \Delta V_{th}(t)]^2, \quad (12)$$

де  $\Delta V_{th}(t)$  визначається сумарним внеском трьох механізмів деградації відповідно до виразу (6).

Оскільки кожен із механізмів описується степеневим законом відносно часу, сумарна деградація також апроксимується степеневою функцією (13):

$$\Delta V_{th}(t_i) \approx A t^n \exp(-E_a/kT), \quad (13)$$

де  $A$  – узагальнений коефіцієнт, що враховує внески всіх трьох механізмів;

$n \approx 0,1 - 0,3$  – показник степеня;

$E_a$  – ефективна енергія активації сумарного процесу деградації.

Апроксимація (13) є прийнятною за умови, що один із механізмів деградації є домінуючим. Для  $p$ -MOSFET при тривалій експлуатації домінує NBTІ (показник  $n \approx 0,25$ ); для  $n$ -MOSFET – HCI (показник  $n \approx 0,3-0,5$ ). При рівному внеску всіх трьох механізмів похибка апроксимації може досягати 15–20 %.

Залишковий ресурс компонента визначається з умови досягнення критерію граничного стану (11). Прирівнюючи  $\Delta I(t^*) = \Delta I_{dox}$  і розв'язуючи відносно  $t^*$ , отримаємо оцінку залишкового ресурсу відповідно до (14):

$$t^* = [(1/A) \Delta V_{thdox} \exp(E_a/kT)]^{1/n}, \quad (14)$$

де  $\Delta V_{thdox}$  – допустима деградація порогової напруги, що відповідає критерію (11).

Параметри  $A, n, E_a$  визначаються методом найменших квадратів за результатами не менше трьох послідовних вимірювань  $I^0(t_i)$  при фіксованій температурі. Логарифмування виразу (13) дає лінійну форму ( $\ln(\Delta V_{th}) = \ln(A) - E_a/(kT) + n \cdot \ln(t)$ ), що дозволяє застосувати стандартну процедуру лінійної регресії.

**Практична реалізація** прогнозу залишкового ресурсу за формулою (14) потребує попереднього визначення параметрів моделі деградації  $A, n, E_a$  для конкретного екземпляра КМОН ІМС. Запропоновано чотириступеневу методику ідентифікації цих параметрів за результатами безконтактних вимірювань струму вихідного транслятора.

#### 1. Вимірювання $I_0(t_i)$ .

Проводиться вимірювання струму вихідного транслятора  $I_0(t_i)$  у стані логічного «0» при фіксованих зовнішніх умовах (не менше трьох вимірів):

температура  $T = const$  (відхилення не більше  $\pm 2$  °C);

напруга живлення  $V_{DD} = const$  (відхилення не більше  $\pm 0,05$  В);

тестова послідовність ідентична для всіх вимірювань;

інтервал між вимірюваннями  $\Delta t \geq 100$  год напрацювання.

Вимірювання виконуються безконтактним індукційним методом в одній контрольній точці (шина живлення) без розмикання електричних кіл [1–4].

#### 2. Визначення $\Delta V_{th}(t_i)$ .

Для кожного вимірюваного значення  $I_0(t_i)$  визначити відповідне значення деградації порогової напруги  $\Delta V_{th}(t_i)$  шляхом розв'язання рівняння (12) відносно  $\Delta V_{th}$  при відомих  $I_0(t_i), \mu_{n0}, C_{ox}, W/L, V_{DD}$ , що задається рівняння (15):

$$\Delta V_{th}(t_i) = V_{DD} - \Delta V_{th0} - \sqrt{[2L \cdot I_0(t_i) / (\mu_{n0} \cdot C_{ox} W \cdot (1 + \theta \cdot \Delta V_{th}))]}. \quad (15)$$

Рівняння (15) розв'язується ітераційно (початкове наближення  $\Delta V_{th} = 0$ , збіжність досягається за 3–5 ітерацій).

#### 3. Лінеаризація і МНК.

Логарифмуванням рівняння (13) отримаємо лінійну форму (16):

$$\ln(\Delta V_{th}) = \ln(A) + n \cdot \ln(t) - E_a/(kT). \quad (16)$$

За трьома і більше парами  $(t_i, \Delta V_{th}(t_i))$  методом найменших квадратів (МНК) визначаються параметри, зазначені у таблиці 2.

Таблиця 2

Фізичний зміст параметрів  $A$ ,  $n$ ,  $E_a$ 

Параметр	Фізичний зміст	Типові значення
$A$	Узагальнений коефіцієнт враховує внески oxide trapping, HCI, NBTI	$10^{-3}$ – $10^{-1}$ [В]
$n$	Показник степеня – субдифузійний характер деградації	0,1–0,3
$E_a$	Ефективна енергія активації сумарного процесу деградації	0,3–0,7 [eВ]

Система рівнянь для МНК у матричній формі представлена виразом (17):

$$[\ln(A), n, -E_a/k] = (X^T X)^{-1} X^T Y, \quad (17)$$

де  $X$  – матриця регресорів розміром  $[m \times 3]$  ( $m$  – кількість вимірювань);  
 $Y$  – вектор  $\ln(\Delta V_{th}(t_i))$ .

#### 4. Перевірка якості апроксимації.

Якість отриманої моделі оцінюється коефіцієнтом детермінації, як це показано у формулі (18):

$$R^2 = 1 - \Sigma(\ln \Delta V_{th,i} - \ln \Delta V_{th,i}^*)^2 / \Sigma(\ln \Delta V_{th,i} - \langle \ln \Delta V_{th} \rangle)^2. \quad (18)$$

Умова прийнятності моделі:  $R^2 \geq 0,95$ .

При  $R^2 < 0,95$  – збільшити кількість вимірювань або перевірити умови вимірювання (стабільність  $T$  і  $V_{DD}$ ).

Визначені параметри  $A$ ,  $n$ ,  $E_a$  підставляються у формулу (14) для обчислення залишкового ресурсу  $t^*$ . Точність оцінки  $t^*$  визначається кількістю вимірювань  $m$  (при  $m = 3$  похибка становить  $\pm 20$ – $30$  %, при  $m \geq 5$  –  $\pm 10$ – $15$  %).

Запропонований підхід до прогнозування на основі реєстрації струму через вихідний транслятор в одній контрольній точці є принциповою перевагою індукційного методу порівняно з традиційними методами діагностування, що потребують розмикання кіл або спеціальних тестових точок доступу.

Наукова новизна:

вперше розроблено діагностичну модель вихідного транслятора КМОН ІМС для безконтактного індукційного методу діагностування, яка враховує сумісну дію трьох механізмів деградації МОН-транзистора (oxide trapping, HCI, NBTI) через узагальнений показник  $\Delta V_{th}(t)$ ;

отримано аналітичний вираз залишкового ресурсу ( $t^* = [(1/A) \cdot \Delta V_{th,max} \cdot \exp(E_a/kT)]^{1/n}$ ), що дозволяє прогнозувати технічний стан КМОН ІМС за результатами безконтактних вимірювань струму вихідного транслятора;

показано, що діагностичні моделі ТТЛ [5] та КМОН ІМС є фізично узгодженими – обидві описують деградацію степеневим законом відносно часу з показником  $n \approx 0,1 - 0,3$ , що відображає субдифузійний характер накопичення деградаційних пошкоджень.

**Висновки.** У статті розроблено діагностичну модель вихідного транслятора КМОН ІМС як розвиток моделі [5] на клас КМОН пристроїв. Модель враховує три механізми деградації МОН-транзисторів – захоплення заряду в підзатворному діелектрику (oxide trapping), ін'єкцію

гарячих носіїв (НСІ) та негативну нестабільність порогової напруги (NBТІ) – через узагальнений показник деградації порогової напруги  $\Delta V_{th}(t)$ .

Отримано аналітичні вирази для діагностичного параметра як функцій  $\Delta V_{th}(t)$  – рівняння (9), (10).

Показано що зростання  $|\Delta V_{th}(t)|$  з часом призводить до монотонного зменшення  $I^0(t)$  та  $I^1(t)$ , що реєструється безконтактним індукційним методом в одній контрольній точці без розмикання електричних кіл.

Сумарна деградація  $\Delta V_{th}(t)$  апроксимується степеневою функцією (рівняння (13)) з показником  $n \approx 0,1 - 0,3$ , що відображає субдифузійний характер накопичення деградаційних пошкоджень. Аналогічний показник характеризує модель деградації ТТЛ ІМС [5], що свідчить про спільну фізичну природу процесів старіння різних типів напівпровідникових структур.

Отримано формулу залишкового ресурсу КМОН ІМС – рівняння (14).

Розроблено методику ідентифікації параметрів моделі деградації  $A$ ,  $n$ ,  $E_a$  за результатами безконтактних вимірювань  $I^0(t_i)$  у не менше трьох моментів часу. Методика базується на лінеаризації рівняння (13) логарифмуванням і МНК-підгонці (рівняння (16), (17)) з перевіркою якості за критерієм  $R^2 \geq 0,95$  (рівняння (18)).

Отримана модель покладена в основу вдосконаленого безконтактного методу технічної діагностики РЕО на базі КМОН ІМС і забезпечує вирішення трьох основних задач діагностування: визначення фактичного технічного стану, локалізації несправності та прогнозування залишкового ресурсу.

Перспективи подальших досліджень полягають у кількісному оцінюванні кореляції між деградацією порогової напруги КМОН-транзисторів та статистичними характеристиками псевдовипадкових послідовностей. Отримані результати стануть основою для розробки методики прогнозування зниження рівня захищеності спеціальних каналів зв'язку внаслідок фізичного зносу елементної бази комутаційного обладнання.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Безконтактний індукційний метод діагностування радіоелектронних блоків / В. В. Вишнівський та ін. *Збірник наукових праць ВІКНУ*. 2013. Вип. 43. С. 17–23.
2. Ленков С. В., Карпенко О. В., Шкуліпа П. А. Діагностична модель радіокомпонента для електромагнітного методу діагностування. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. 2011. № 3 (12). С. 31–33.
3. Жердев М. К., Шкуліпа П. А. Побудова діагностичної моделі транзистора в активному режимі роботи для енергодинамічного методу діагностування. *Збірник наукових праць ХУПС*. 2012. Вип. 4 (33). С. 122–124.
4. Жердев М. К., Кузавков В. В. Побудова функціональних перевірних тестів для безконтактного індукційного методу діагностування. *Системи озброєння та військова техніка*. 2014. № 4 (40). С. 73–76.
5. Кузавков В. В., Редзюк Є. В. Діагностична модель вихідного транслятора напівпровідникової інтегральної схеми. *Управління в складних системах*. 2019. № 1. С. 77–79. DOI: 10.26906/SUNZ.2019.1.077.
6. Radiation Effects in MOS Oxides / J. R. Schwank et al. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2008. Vol. 55, № 4. P. 1833–1853. DOI: 10.1109/TNS.2008.2001040.
7. Barnaby H. J. Total-ionizing-dose effects in modern CMOS technologies. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2006. Vol. 53, № 6. P. 3103–3121.
8. Takeda E., Suzuki N. An empirical model for device degradation due to hot-carrier injection. *IEEE Electron Device Letters*. 1983. Vol. 4, № 4. P. 111–113.
9. A comprehensive framework for predictive modeling of negative bias temperature instability / S. Chakravarthi et al. *Proc. IEEE IRPS*. 2004. P. 273–282.

10. Fleetwood D. M. Total-ionizing-dose effects, border traps, and periodic table. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2002. Vol. 49, № 3. P. 1647–1654.

11. Amerasekera A., Duvvury C. ESD in Silicon Integrated Circuits. 2nd ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2002. 430 p.

12. Physical Mechanism of NBTI Degradation – From Interface Damage to Bulk Trap Generation / S. Mahapatra et al. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2013. Vol. 60, № 3. P. 901–916. DOI: 10.1109/TED.2013.2238237.

*Надійшла до редколегії 22.04.2026.*

*Схвалена до друку 22.05.2026.*

*Дата публікації 29.05.2026.*