

АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ КОЛА ПЕРВИННОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЄМНІСНИХ СЕНСОРІВ ВОЛОГОСТІ

© Голяка Р.Л., Мельник О.М., Гладун М.Р., Готра О.З., 2004

Розглянуті методи аналізу параметрів кола первинного перетворювача в сенсорах вологості ємнісного типу. Відзначено, що у деяких задачах необхідний детальний аналіз розподілених структур ємнісних перетворювачів, параметрами яких є не лише ємність, але і опори та індуктивності. Показано, що при значних значеннях паразитної індуктивності розподіленої структури відзначена нестабільність перехідних процесів заряду ємності сенсора.

The methods for analysis of circuit parameters of primary transducer in humidity sensors of capacitive type are considered. It is established that detailed analysis of distributed structures of capacitive sensors is required and it is necessary to take into account not only capacitance but also resistance and inductance. High parasitic inductance can cause instability in charge transition processes of sensor capacity.

Вступ та постановка задачі

У статті проаналізовано параметри кола первинного перетворювача сенсорів вологості на основі розподіленої ємнісної структури, параметри якої є функцією накопиченої в діелектрику вологи. Хоча первинний перетворювач вологості ємнісного типу може бути представленим у вигляді конденсатора із зосередженими параметрами, у деяких задачах необхідний детальніший аналіз. Актуальність такого аналізу зумовлена тим, що ємнісні перетворювачі сенсорів вологості є розподіленими структурами, які характеризуються не лише ємністю, але і опорами та індуктивністю. Очевидно, значення цих паразитних величин не є великими, однак ємність первинних перетворювачів мікроелектронних сенсорів вологості також має досить малі значення. Так, типовим значенням ємності мікроелектронних сенсорів є $C_x = 10..100$ пФ, а їх зміна під дією вологи (інформативна величина сенсора) має порядок $\Delta C_x = 0,1$ пФ на 1 % зміни відносної вологості [1–3].

Вимірювання малих ємностей є непростим завданням [4–6]. Адже для забезпечення роздільної здатності $\Delta C_x = 0,1$ пФ смуга частот вимірювального кола повинна становити десятки і навіть сотні мегагерц. На таких частотах навіть паразитні індуктивності в декілька часток мікрогенрі можуть істотно вплинути на результат вимірювання. Істотним також буде вплив на результат вимірювання неідеальності діелектрика ємності первинного перетворювача. Так, на частоті $f = 10$ МГц приріст провідності вимірювального кола при зміні ємності на $\Delta C_x = 0,1$ пФ буде становити

$$\Delta R_C = \frac{1}{2\pi f \Delta C_x} \approx 160 \text{ кОм}.$$

Припустимо, що під час експлуатації сенсора омична складова провідності змінюється на 100 кОм, що, враховуючи умови експлуатації сенсора (висока вологість), є цілком реальним. Тоді, як свідчить аналіз, абсолютне значення похибки вимірювання ємності, а отже, і вологості буде співрозмірним з роздільною здатністю сенсора ($\Delta C_x = 0,1$ пФ).

Крім того, для мінімізації впливу омичної складової провідності ємнісного сенсора доцільно ввести в структуру сенсора додаткові функціональні елементи, наприклад, для вимірювання

температури первинного перетворювача вологості чи для інтенсифікації випаровування накопиченої в діелектрику ємності вологи. У разі поєднання таких додаткових елементів з електродами ємності первинного перетворювача, що робиться для зменшення кількості виводів сенсора та ліній передачі сигналів, буде збільшуватися паразитна індуктивна складова розподіленої RLC – структури сенсора.

Все це ставить завдання аналізу впливу параметрів розподілених структур первинних перетворювачів ємнісних сенсорів на результат вимірювання.

Об'єкти дослідження

Розглянемо низку структур ємнісних перетворювачів. На рис. 1, а наведено переріз структури ємнісного сенсора вологості зустрічно-смугового типу та її спрощену еквівалентну схему.

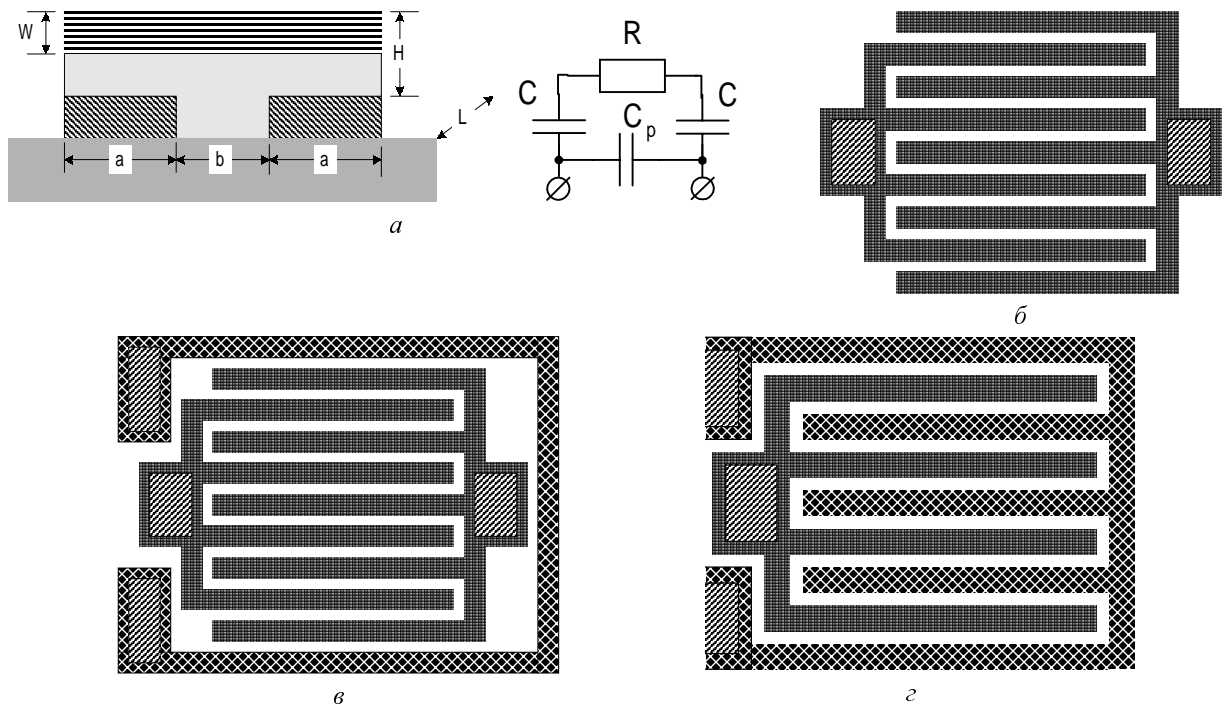


Рис. 1. Структури первинних перетворювачів сенсорів вологості ємнісного типу

На діелектричну підкладку нанесено шар металізації, в якому методом фотолітографії витравлені смуги шириною – a та відстанню – b між ними. Над цими смугами нанесено вологочутливий шар діелектрика товщиною – H . Товщина приповерхневого шару, в якому накопичується волога, позначена як W . В зонах приєднання до шару металізації контактів у діелектрику витравлені контактні вікна.

Типовими топологіями таких первинними перетворювачами є:

- елементарна двовивідна зустрічно-смугова структура – рис. 1, б;
- двовивідна зустрічно-смугова структура, по периметру якої сформовано двовивідне резистивне кільце – рис. 1, в;
- поєднана зустрічно-смугова структура, в якій один електрод ємності має два виводи і поєднує функцію резистивного кільця – рис. 1, г.

Резистивне кільце оточує по периферії зустрічно-штировий конденсатор, і, якщо необхідно (наприклад для зменшення кількості виводів), може з'єднуватися з одним виводом конденсатора (рис. 1, б). Призначенням резистивного елемента є вимірювання температури сенсора вологості та його контрольоване нагрівання при термостабілізації чи термовідпалі. Термовідпалення здійснюється періодично при зниженні добротності конденсатора, наприклад, в умовах конденсації вологи. Температура термовідпалу становить $80..100$ °С.

Першими етапом аналізу наведених вище структур є визначення впливу на інформативний параметр сенсора, тобто ємність зустрічно-смугової структури, геометричних розмірів останньої. Відповідно до наведеної на рис.1, а еквівалентної схеми структура первинного перетворювача в першому наближенні може бути зображена у вигляді суми елементарних комірок, до складу яких входять: C – ємності, значення яких є інформативним параметром перетворювача (залежить від вологості), R – опір приповерхневої ділянки з адсорбованою вологою, C_p – ємність структури за відсутності адсорбованого приповерхневого шару (неінформативна ємність структури).

Враховуючи, що значення ємності структури мікроелектронного первинного перетворювача є малим, її необхідно вимірювати на високих частотах. Тому, розраховуючи параметри структури, необхідно використовувати розрахункові методи високочастотної техніки. Зокрема, параметри кола зустрічно-смугової структури можуть бути описані за допомогою $[y]$ -матриці чотириполусника [7]

$$y_{11} = y_{22} = \frac{2(Z_p \operatorname{cth} \gamma_p L + Z_n \operatorname{cth} \gamma_n L)}{Z_p^2 + Z_n^2 + 2Z_p Z_n (\operatorname{cth} \gamma_p L \operatorname{cth} \gamma_n L + \operatorname{csc} h \gamma_p L \operatorname{csc} h \gamma_n L)};$$

$$y_{12} = y_{21} = \frac{-2(Z_p \operatorname{csc} h \gamma_p L - Z_n \operatorname{csc} h \gamma_n L)}{Z_p^2 + Z_n^2 + 2Z_p Z_n (\operatorname{cth} \gamma_p L \operatorname{cth} \gamma_n L + \operatorname{csc} h \gamma_p L \operatorname{csc} h \gamma_n L)},$$

де L – довжина смуг; Z_p, Z_n – хвильовий опір зв'язаної лінії при парному та непарному збудженні хвилі, відповідно; γ_p, γ_n – стала поширення хвилі при парному та непарному збудженні, відповідно.

Використовуючи методику [8] для розрахунку ємності C та паразитної індуктивності L зустрічно-смугової структури при її послідовному увімкненні, можна використати провідність $Y(f)$ та її похідну $Y'(f)$

$$Y(f) = \left[2\pi f L - \frac{1}{2\pi f C} \right]^{-1}; \quad Y'(f) = -Y^2(f) \left[2\pi L - \frac{1}{2\pi f^2 C} \right]^{-1},$$

звідки знаходять

$$L = \frac{1}{4\pi f Y(f)} \left[\frac{f Y'(f)}{Y(f)} - 1 \right]; \quad C = \frac{Y(f)}{\pi f \left[1 + f Y'(f) / Y(f) \right]}.$$

Тоді в аналітичному вигляді наближений розрахунок ємності можна здійснити за допомогою формули

$$C = \frac{1}{3} L(N-1)(\epsilon+1)\epsilon_0 \left[\ln \left(1 + \frac{a}{b} \right) + \frac{3}{4} \right],$$

де a – ширина смуг; b – зазор між смугами (див. рис.1, а); ϵ_0, ϵ – абсолютна та відносна діелектричні сталі.

У сенсорній техніці, на відміну від техніки високих частот, абсолютні значення параметрів кола, зокрема, в нашому випадку – ємності первинного перетворювача, не мають істотного значення. Передовсім нас цікавлять не абсолютні значення, а їх зміна під дією вимірюваної фізичної величини. Тому розрахунок кола первинного перетворювача можна виконати в умовних (безрозмірних) одиницях ємності, і на підставі цього розрахунку дати аналіз зміни параметрів, зокрема чутливості, сенсорного пристрою.

Для такого аналізу нами виконані розрахунки зміни нормованої ємності зустрічно-смугової структури сенсора вологості зі зміною товщини та провідності приповерхневого шару, в якому відзначається адсорбція вологи. Приклади таких розрахунків наведені на рис. 2 та рис. 3. Зокрема, на рис. 2, а наведено залежності нормованої ємності $C(W, H, a, b)$ та нормованого опору приповерхневого шару $R(W, H, a, b)$ від товщини приповерхневого шару W при фіксованих значеннях товщини діелектричного шару H , ширини смуг a та зазору між смугами b зустрічно-смугової структури сенсора вологості. Вважається, що оскільки волога проникає лише в приповерхневу область діелектрика (для зменшення інертності та гістерезису функції перетворення сенсора вологості товщина шару, в який відбувається адсорбція вологи, повинна бути мінімальною), саме зміна параметрів приповерхневого шару буде мати максимальний вплив на ємність структури. На рис. 2, б залежність ємності C структури заміненена на залежність реактивного опору R_C структури на певній фіксованій частоті f .

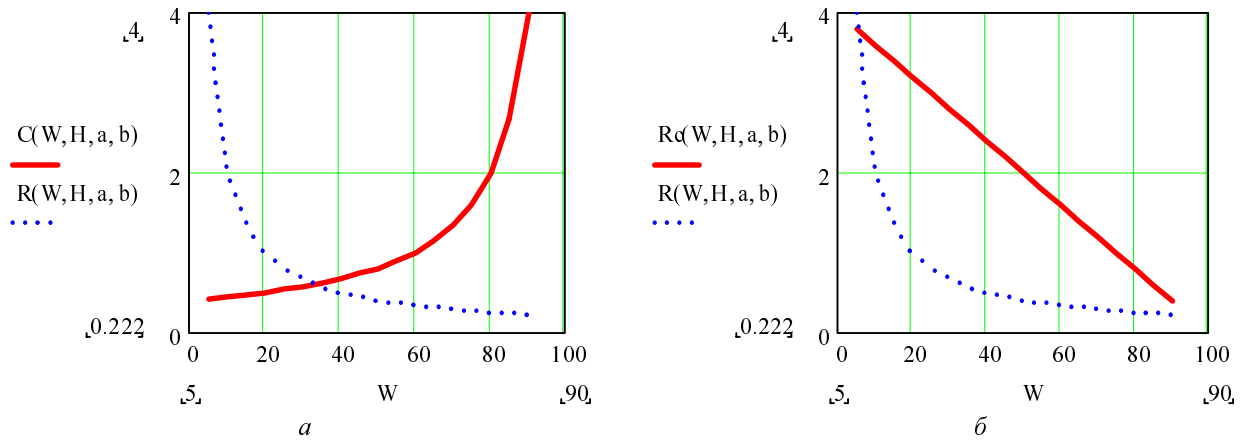


Рис. 2. Залежності ємності C , опору R та сумарного імпедансу R_C структури сенсора від товщини приповерхневого шару

Враховуючи, що вторинне перетворення відбувається за допомогою вимірювання імпедансу структури сенсора на певній фіксованій частоті, інформативним параметром пристрою буде сумарний імпеданс (або обернена до нього провідність γ_f) $R_f(W, H, a, b) = R_C(W, H, a, b) + R(W, H, a, b)$. Результати розрахунку залежності $R_f(W, H, a, b)$ від товщини приповерхневого шару W при дискретній зміні товщини діелектрика H наведено на рис. 3, а. Аналогічні розрахунки при дискретній зміні зазору b між смугами – на рис. 3, б.

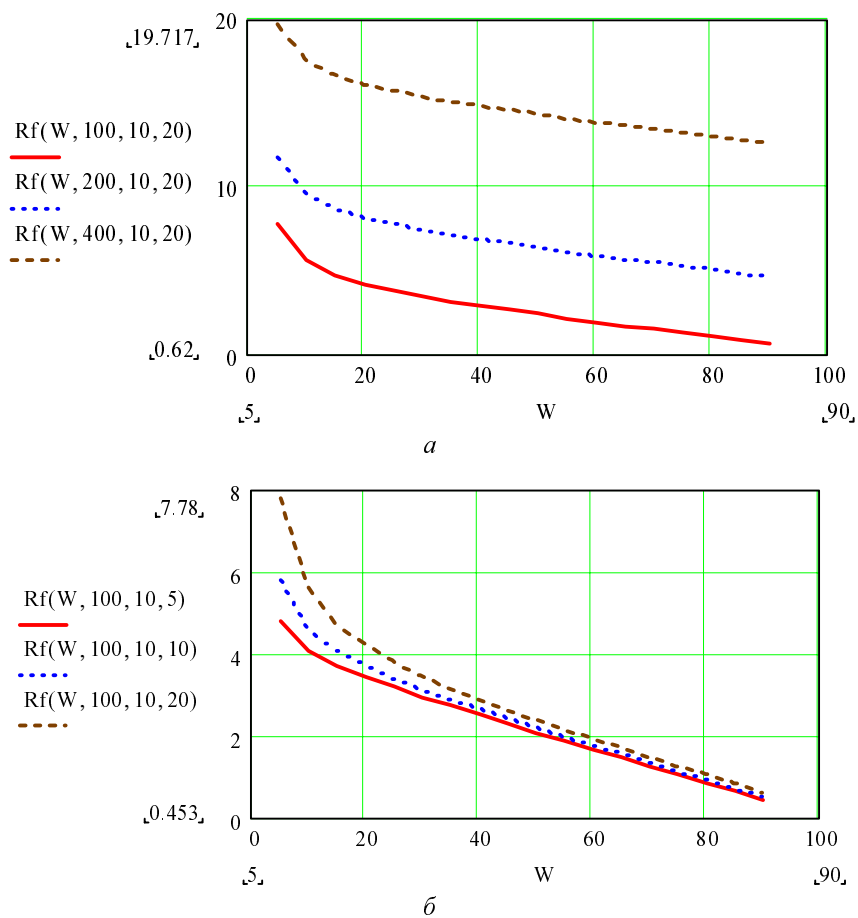


Рис. 3. Залежності сумарного імпедансу $R_f(W, H, a, b)$ від товщини W при дискретній зміні параметрів H, a, b

Як зрозуміло з наведених графіків, важливість розрахунків такого типу є очевидною – видається можливим визначити співвідношення між параметрами структури, за яких відзначається максимальне значення чутливості сенсора чи мінімальна нелінійність функції перетворення. Як видно з графіків, ці параметри є взаємно суперечливими, а отже, в кожному конкретному випадку необхідний компромісний вибір геометричних параметрів структур сенсорів.

Другим етапом аналізу є визначення впливу на результати вимірювання паразитних параметрів первинного перетворювача, і зокрема, паразитної індуктивності та неідеальності діелектричного шару структури сенсора. Як і у вищерозглянутому розрахунку, цей етап можна здійснити класичними підходами високочастотної техніки. Однак трудомісткість таких розрахунків є дуже високою, а враховуючи поширення нині спеціалізованих пакетів прикладних програм розрахунку електричних кіл, видається доцільним розрахунки виконати за допомогою таких прикладних програм.

Нижче наведені приклади результатів моделювання кола первинного перетворювача з розподіленою ємнісною структурою в середовищі PSPICE A/D – 2000. Модель заміщення на рис. 4 подана у вигляді послідовно з'єднаних опорів R , який задає струм заряду структури, індуктивності L , яка імітує паразитну індуктивність структури та ємності C , яка є інформативним параметром сенсора. Для наочності значення ємності становить $C = 1$ пФ, що є характерним, коли аналізують не заряд всієї ємності сенсора, а лише її зміни під час вимірювання вологості. Паралельно до ємності під'єднано елемент типу вольтметра V_m , який дає змогу спостерігати за формою перехідного процесу заряду ємності.

Для порівняльного аналізу одночасно моделюють чотири кола, які відрізняються значенням паразитної індуктивності $L = 0.1$ нГн, 300 нГн, 1000 нГн, 3000 нГн. Як випливає з наведених результатів, видається можливим не лише знайти залежність сталої часу вимірювального кола первинного перетворювача, але і виявити наявність паразитних коливальних процесів.

Характерним також є інший метод, в якому аналізується вплив на параметри вхідного кола паразитних послідовного та паралельного опорів розподіленої RC-структури сенсора. Приклад результатів такого аналізу наведено на рис. 5. Так, при введенні у модель паралельного опору, наприклад $R_{pi} = 5$ кОм, який враховує неідеальність діелектрика конденсатора і є оберненою величиною до струму просочування діелектрика, картина зарядного процесу різко змінюється. А саме – не тільки збільшується стала часу заряду, але і зменшується амплітуда вихідного сигналу.

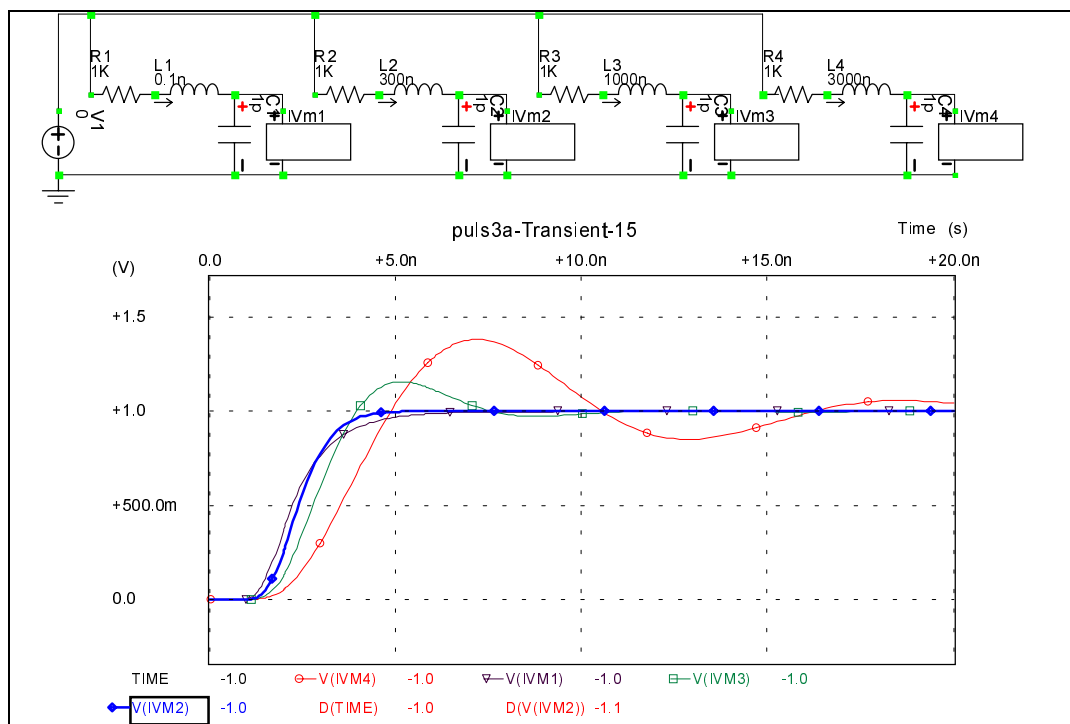


Рис. 4. Результати моделювання впливу паразитної індуктивності доріжок ємнісного сенсора з розподіленою LC- структурою при $C_i = 1$ пФ

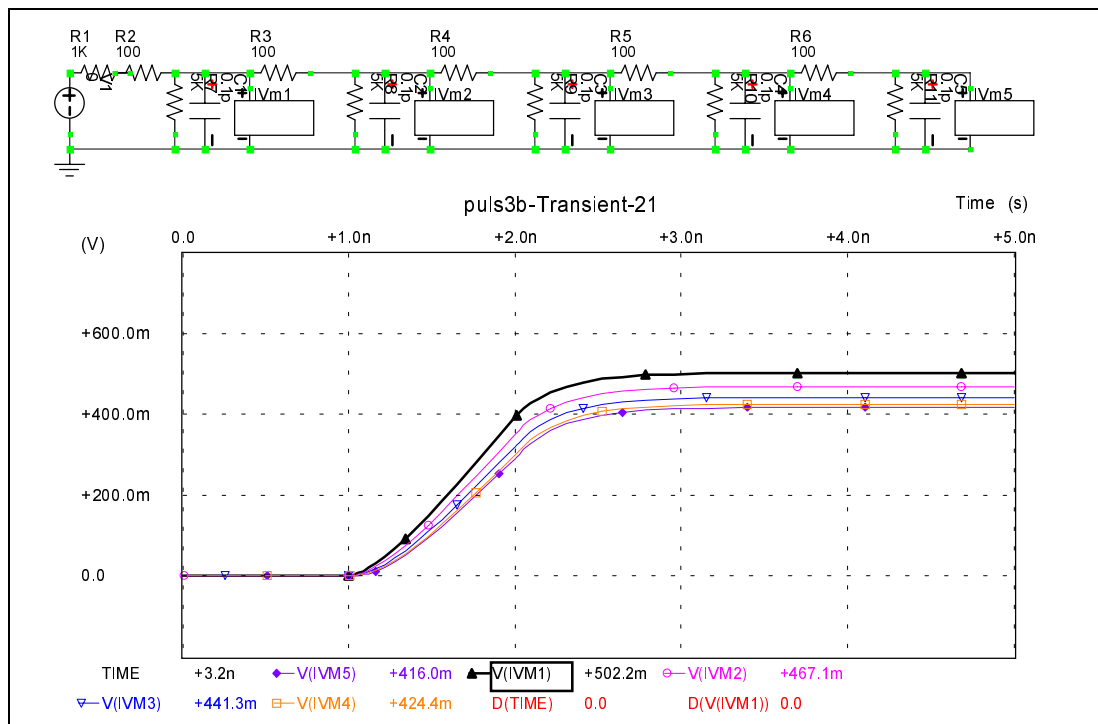


Рис. 5. Результати моделювання розподіленої RC-структури сенсора, якщо $R_i = 100 \text{ Ом}$ та $C_i = 0.1 \text{ пФ}$ з урахуванням неідеальності діелектрика

Висновки

Традиційно первинний перетворювач сенсорів вологості ємнісного типу зображається у вигляді конденсатора з зосередженими параметрами. Однак у низці задач необхідний детальніший аналіз, актуальність якого зумовлена тим, що ємнісні перетворювачі сенсорів вологості є розподіленими структурами. Параметрами таких структур є не лише ємність, але і опори та індуктивності. Розглянуті в статті результати моделювання показують, що під час розробки мікроелектронних сенсорних пристроїв вологості ємнісного типу необхідно приділяти значну увагу аналізу впливу паразитних параметрів структури сенсора на параметри вимірювального кола первинного перетворювача. Показано, що при значних значеннях паразитної індуктивності розподіленої структури відзначається нестабільність перехідних процесів заряду ємності сенсора. Коректний аналіз кола первинного перетворювача дає змогу уникнути вказаних проблем, а, отже, підвищити точність вимірювання.

1. Qiu Y., Azeredo Leme C., Franca J.E. CMOS Humidity sensor with calibrated voltage output. *The 14 European Conference on Solid-State Transducers August 27–30, copenhagen, denmark. 2000. PP. 75–78.*
2. Ruther P., Burg M., Steinert C., Paul O. Humidity microsensors using silica aerogel thin films. *The 14 European Conference on Solid-State Transducers August 27–30, copenhagen, denmark. 2000. PP. 79–82.*
3. Вудуард С. Прецизионный емкостной сенсор // *Электроника. 1993. №3. С. 74–75.*
4. Аналогова мікросхемотехніка вимірювальних та сенсорних пристроїв / За ред. З.Готри, Р. Голяки. – Львів: Вид. Державного університету "Львівська політехніка", 1999. – 364 с.
5. Осадчий Е.П., Арбузов В.П., Ларкин С.Е. Преобразователь емкости датчика в напряжение // *Приборы и системы управления. –1995. –№1. С. 22–25.*
6. Гутников В.С, Соловьев А.Л, К.В. Рудаков, Ульянов В.А. Измерительная система для емкостных датчиков // *Приборы и системы управления. –1991. –№5. С. 24–26.*
7. Данилин В.Н., Кушниренко А.И., Петров Г.В. Аналоговые полупроводниковые интегральные схемы СВЧ. – М., 1985.
8. Балыко А.П., Красноперкин В.М., Манченко Л.В. и др. Расчет и исследование на ЭВМ планарных сосредоточенных элементов для интегральных схем. Ч.1. Планарные гребенчатые конденсаторы. – *Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ, 1981. Вып. 9. – С. 7–11.*