

PACS: 85.40.Ry

ISSN 1729-4428 (Print)
ISSN 2309-8589 (Online)

Н.Р. Ільницький¹, Т.Р. Сорохтей², В.М. Уманців², М.Ф. Павлюк², Л.І. Никируй²,
Р.В. Ільницький²

Проектування цифро-аналогових перетворювачів сигналів для сенсорних мікросистем на кристалі

¹Івано-Франківський національний медичний університет, Івано-Франківськ, Україна;

²Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, Івано-Франківськ, Україна,
roman.ilnitsky@pnu.edu.ua

Наведено результати комп'ютерного моделювання розробленої конструкції цифро-аналогового перетворювача Р-2Р, а також результати зі значеннями вихідної напруги для різних цифрових вхідних кодів. Запропоновано топологію такого пристрою та модульовано його роботу. Таким чином, програмний додаток MicroWind використовувався для моделювання та розробки роботи перетворювача цифрового сигналу в аналоговий, оскільки це програмний інструмент із відкритим кодом для всіх користувачів, який дозволяє проектувати та моделювати інтегральну схему за фізичним описом (IC) рівень.

Ключові слова: цифро-аналоговий перетворювач, програмне середовище MicroWind, субмікронна технологія.

Подано до редакції 12.05.2024; прийнято до друку 13.05.2024.

Вступ

Для моделювання та розробки роботи перетворювача цифрового сигналу в аналоговий було використано програмний застосунок MicroWind 3.1 оскільки це програмний інструмент з відкритим кодом для всіх користувачів, який дозволяє проектувати та моделювати інтегральну схему на рівні фізичного опису (IC). Також програма DSCH3.5 є логічним редактором і симулятором електронних схем. DSCH3.5 використовується для перевірки архітектури логічної схеми перед початком проектування мікроелектроніки. DSCH забезпечує зручне середовище для проектування ієрархічної логіки та моделювання з аналізом затримки, що дозволяє проектувати та перевіряти складні логічні структури. Тому були використані саме ці інструменти для моделювання роботи ЦАП.

I. Результати та обговорення

Для моделювання та розробки топології добре підійде R-2R ЦАП, який є досить простим у своїй будові. Відповідно до схеми цього перетворювача було спроектованого його модель в програмному застосунку DSCH.

Відповідно, така модель складається з трьох резисторів номіналом 1кОм та п'яти резисторів номіналом 2кОм (хоча і в подальшому були використані вдвоє менші параметри), крім них в схемі ще є чотири КМОН транзистори n-типу, на які і подаються цифрові сигнали. У нашому випадку цифровим нулем виступає 0В, а одиницею – 1.2В. На схемі у DSCH це можна реалізувати за допомогою простого електричного перемикача. Щоб перенести схему перетворювача з DSCH в середовище з фізичним рівнем моделювання MicroWind потрібно розробити топологію для цього пристрою. На рис. 2 та 3 приведені моделі КМОН резистора та транзистора, використані у моделюванні. Резистори мають типовий для технології КМОН вигляд, та виготовлені з

полікремнію. Резистори номіналом $2R$ моделювались вручну, а не за допомогою інструменту автоматизації «layout generator». Транзистори також мають досить типову топологію, на затвори подають цифровий сигнал, витік заземлено, а стік з'єданий з резистивною матрицею R-2R.

Роздільна здатність ЦАП R-2R пов'язана з точністю резисторів і опором перемикачів, який має бути незначним, щоб уникнути падіння напруги та деякої нелінійності. Важливо реалізувати перемикач з низьким опором увімкнення (велика ширина, мінімальна довжина) разом із великими резисторами

R. Щоб компенсувати опір ввімкнення пристрою pMOS, фіктивний перемикач, опір проходження якого становить половину опору ввімкнення, можна вставити в кожну комірку послідовно з R. На рис. 4 приведена конструкція чотирьохбітного цифро-аналогово перетворювача сигналу на фізичному рівні, розроблена за допомогою MicroWind 3.1. Як і було згадано раніше, резистори мають номінали вдвічі менші ніж в моделі DSCH – 500 Ом та 1кОм.

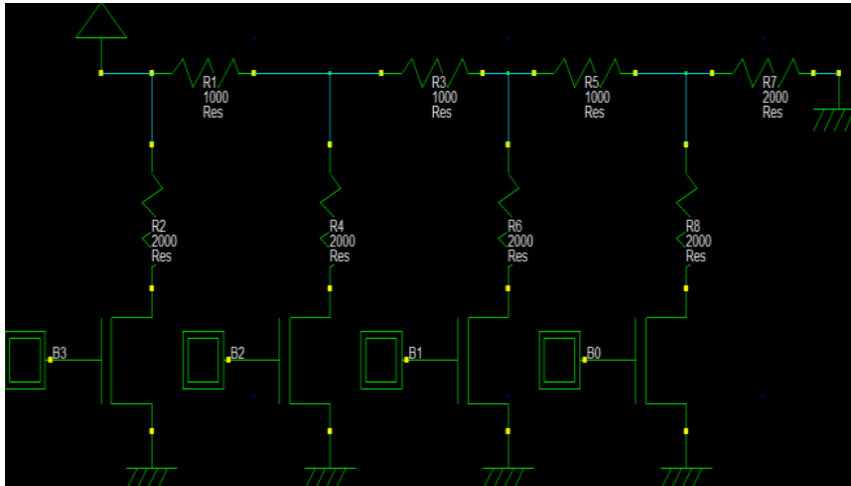
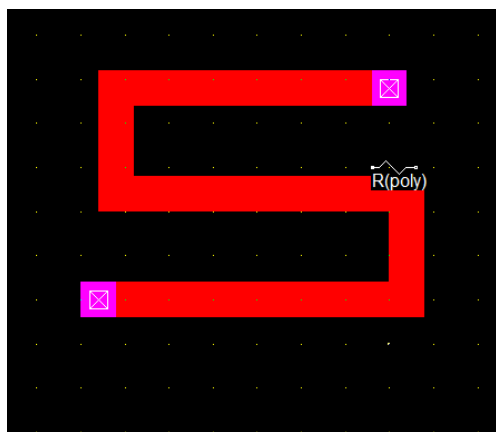
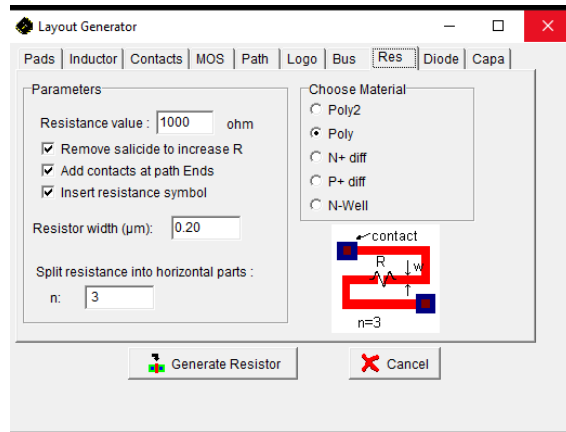


Рис 1. Модель R-2R ЦАП в DSCH 3.5.

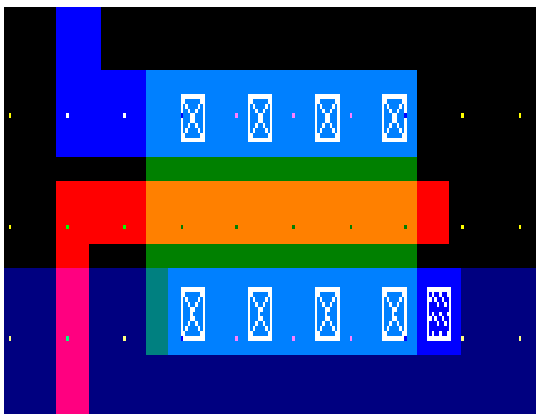


a)

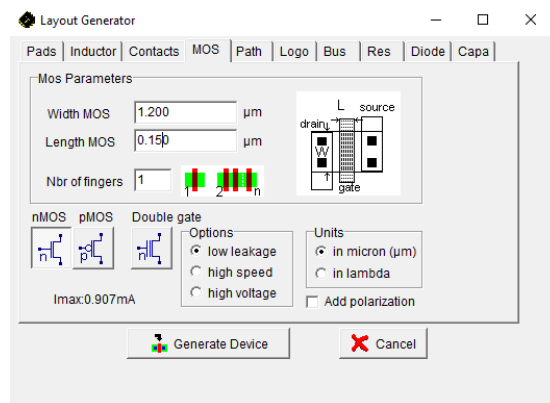


б)

Рис. 2. КМОН резистор а) та процес його генерації б) у MicroWind 3.1.



a)



б)

Рис. 3. КМОН транзистор а) та процес його генерації б) у MicroWind 3.1.

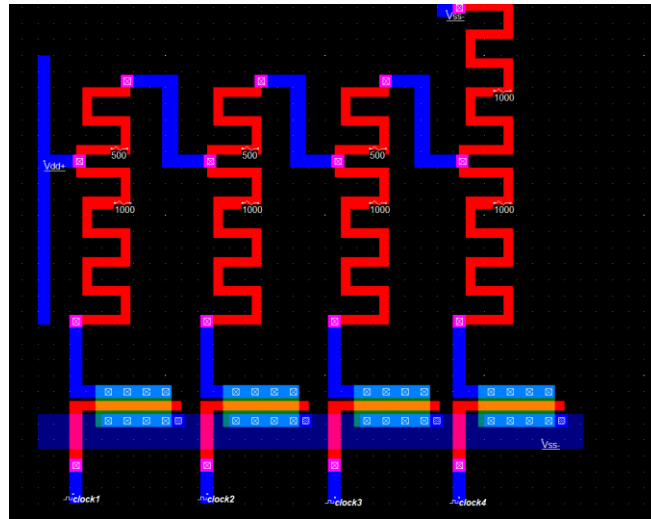


Fig. 4. Topology of R-2R DAC in MicroWind 3.1.

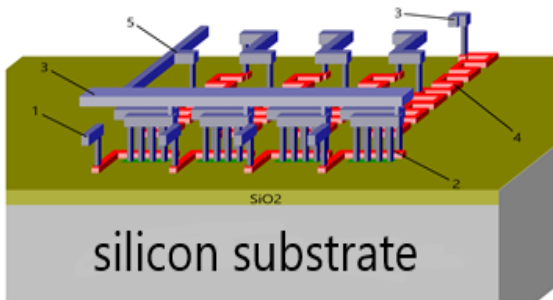


Рис. 5. Об'ємне зображення R-2R ЦАП..

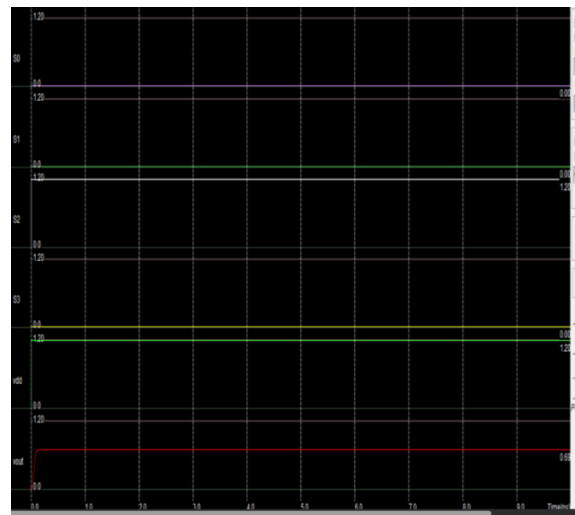


Рис. 6. Результати моделювання при цифровому коді 0100.

Таблиця 1.

Результати моделювання R-2R ЦАП

Десятковий код	Цифровий код				Напруга на виході	
	B1	B2	B3	B4	Теоретична	Реальна
0	0	0	0	0	1,2	1,2
1	0	0	0	1	1,125	1,15
2	0	0	1	0	1,05	0,93
3	0	0	1	1	0,975	0,87
4	0	1	0	0	0,9	0,69
5	0	1	0	1	0,825	0,64
6	0	1	1	0	0,75	0,53
7	0	1	1	1	0,675	0,5
8	1	0	0	0	0,6	0,35
9	1	0	0	1	0,525	0,29
10	1	0	1	0	0,45	0,24
11	1	0	1	1	0,375	0,22
12	1	1	0	0	0,3	0,15
13	1	1	0	1	0,225	0,11
14	1	1	1	0	0,15	0,09
15	1	1	1	1	0,075	0,07

Дана схема розроблена у технології КМОН 90 нм та має такі розміри:

Ширина: 9.2 мкм (183 лямбда)

Висота: 7.9 мкм (157 лямбда)

Загальна площа: 71,8 мкм².

На рис. 5 наведено об'ємне зображення цифро-аналогового перетворювача. Цифрами позначені основні деталі схеми: 1 – зони, на які подається цифровий код; 2 – КМОН транзистори; 3 – VSS-, заземлення; 4 – КМОН резистори; 5 – VDD+, джерело живлення в 1.2В.

На рис. 5. приведено результат симуляції схеми при цифровому коді 0100, значення відрізняється від приведенного в таблиці 1.

У зв'язку зі зростаючою популярністю до монолітних систем на кристали, тобто до МЕМС, ЦАП повинен бути реалізований у субмікронній КМОН-технології низької напруги, щоб досягти низьких витрат на виробництво та мати можливість інтегруватись з іншими схемами. Тому і було розроблено топологію такого пристрою і промодульовано його роботу. Крім того цей варіант ЦАП може бути і вдосконалений у ефективному використанні площі кремнієвого кристалу.

Результати моделювання роботи схеми в середовищі MicroWind приведені в таблиці 1. Розбіжність в отриманих результатах не є великою проблемою, оскільки збігів в результатах моделювання при різних цифрових кодах немає. Це дозволяє побудувати таблицю істинності на основі реальних результатів.

Висновок

Архітектура таких ЦАП проста, має вихідну напругу (але вихідний імпеданс залежить від

цифрового коду), яка за своєю суттю монотонна – навіть якщо резистор випадково замкнуто накоротко, вихід n не може перевищувати вихід $n + 1$. Він є лінійним, якщо всі резистори є рівні, але можуть бути зроблені навмисно нелінійними, якщо потрібен нелінійний ЦАП. Оскільки під час переходу працюють лише два комутатори, це архітектура з низьким рівнем збоїв. Крім того, збій перемикачів не залежить від коду, що робить його ідеальним для програм із низьким спотворенням. Оскільки збій є відносно постійним незалежно від переходу коду, частотний вміст збою відповідає швидкості оновлення ЦАП і його гармонікам, а не гармонікам основної вихідної частоти ЦАП. Основним недоліком рядкового ЦАП є велика кількість резисторів і перемикачів, необхідних для високої роздільної здатності, і, як наслідок, він зазвичай не використовувався як проста архітектура ЦАП, доки нещодавня поява дуже малих розмірів функцій ІС не зробила його дуже практичним для ЦАП з низькою і середньою роздільною здатністю. Сьогодні ця архітектура досить широко використовується в простих ЦАП, таких як цифрові потенціометри.

Льницький Н.Р. – студент;

Сорохтей Т.Р. – аспірант;

Уманців В.М. – кандидат фізико-математичних наук;

Павлюк М.Ф. – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки;

Никируй Л.І. – кандидат фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри фізики і хімії твердого тіла;

Льницький Р.В. – доктор фізико-математичних наук, професор кафедри матеріалознавства і новітніх технологій.

- [1] S. Balasubramanian, V. J. Patel, & W. Khalil, *Current and Emerging Trends in the Design of Digital-to-Analog Converters*. In: Carbone, P., Kiaei, S., Xu, F. (eds) Design, Modeling and Testing of Data Converters. Signals and Communication Technology. Springer, Berlin, Heidelberg, 83 (2014); https://doi.org/10.1007/978-3-642-39655-7_3.
- [2] K. V. Ogorodnyk, B. P. Knysh, P. M. Ratushny, O. O. Lazarev, *Modeling in electronics: a study guide*. VNTU, Vinnytsia, 118 p. (2017).
- [3] O. Aiello, P. Crovetto, & M. Alioto. *Fully synthesizable low-area analogue-to-digital converters with minimal design effort based on the dyadic digital pulse modulation*, IEEE Transactions on Circuits and Systems, 66(8), 70890 (2020); <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2986949>.
- [4] M. Gustavsson, J. J. Wikner, N. N. Tan, M. Gustavsson, J. J. Wikner, & N. N. Tan. *Overview of D/A Converter Architectures*, CMOS Data Converters for Communications, 87 (2002); https://doi.org/10.1007/0-306-47305-4_4.
- [5] Jaime Castillo-Leon, Winnie Svendsen, Maria Dimaki, Valentina Arima, Muhammad Akram, Sandrine Miserere, Christiane Neumann, G. Kipling. *Lab-on-a-Chip Devices and Micro-Total Analysis Systems*, A Practical Guide (2015); <https://doi.org/10.1007/978-3-319-08687-3>.
- [6] Athanasios Giannitsis. *Microfabrication of biomedical lab-on-chip devices. A review*, Estonian Journal of Engineering, 17, 109 (2011); <https://doi.org/10.3176/eng.2011.2.03>.
- [7] P. Abgrall and A.-M. Gué. *Lab-on-chip technologies: making a microfluidic network and coupling it into a complete microsystem—a review*, J. Micromech. Microeng., 17 R15 (2007); <https://doi.org/10.1088/0960-1317/17/5/R01>.
- [8] D.C. Duffy, J. Cooper McDonald, O. J. A. Schueller and G. M. Whitesides. *Rapid prototyping of microfluidic systems in poly(dimethylsiloxane)*, Anal. Chem., 70, 4974 (1998); <https://doi.org/10.1021/ac980656z>.
- [9] S. Zare Harofte, et al., *Recent Advances of Utilizing Artificial Intelligence in Lab on a Chip for Diagnosis and Treatment*, Small, 18(42), 2203169 (2022); <https://doi.org/10.1002/sml.202203169>.

- [10] S.-I. Funano, N. Ota, and Y. Tanaka. *A simple and reversible glass–glass bonding method to construct a microfluidic device and its application for cell recovery*, Lab on a Chip, 21(11), 2244 (2021); <https://doi.org/10.1039/D1LC00058F>.

N.R. Ilnytskyi¹, T.R. Sorokhtey², V.M. Umantsiv², L.I. Nykyruy², M.F. Pavlyuk²,
R.V. Ilnytskyi²

Design of digital-to-analogue signal converters for sensor microsystems on a crystal

¹*Ivano-Frankivsk National Medical University, Ivano-Frankivsk, Ukraine;*

²*Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, Ivano-Frankivsk, Ukraine, roman.ilnitsky@pnu.edu.ua*

The results of computer simulation of the developed R-2R digital-to-analogue converter design are given. Results with output voltage values for different digital input code are also given. The topology of such device is proposed, and its operation is modulated. Thus, the MicroWind software application was used to modelling and develop the operation of the digital signal to analogue converter, as it is an open-source software tool for all users, which allows the design and simulation of an integrated circuit at the physical description (IC) level.

Keywords: digital-to-analogue converter, MicroWind software, submicron technology.