

## Лабораторна робота №3

### ЦАП. ВИКОРИСТАННЯ ШІМ ДЛЯ ЦАП. ЦАП R2R НА МАТРИЦІ

#### Мета роботи:

1. Практичне ознайомлення з ЦАП.
2. Цифро-аналогове перетворення на базі Arduino з використанням ШІМ.
3. Цифро-аналогове перетворення на базі Arduino з використанням R2R матриці.

#### 1 Короткі теоретичні відомості

##### 1.1 Принцип ЦА-перетворення. Параметри ЦАП

Основне призначення ЦАП – автоматичне перетворення (декодування) двійкових кодів на еквівалентні їм значення будь-якої фізичної величини (напруги або струму). Кількісний зв'язок між вхідним числовим, переважно двійковим, кодом  $N_2$  і його аналоговим еквівалентом, наприклад напругою  $U_{вих}$  для довільного моменту часу  $t_1$  визначається за співвідношенням:

$$U_{вих.i} = \Delta U N_{2i} \pm \delta U_i, i \in \{0, 1, \dots, n-1\}, \quad (1.1)$$

де  $\Delta U$  – крок квантування за рівнем напруги, тобто “вага” одного дискрету напруги, якій відповідає один двійковий розряд;

$$N_2 = 2^0 X_0 + 2^1 X_1 + \dots + 2^{n-1} X_{n-1} = \sum_{i=0}^{n-1} 2^i X_i;$$

$X_i \in X \{X_0, X_1, \dots, X_{n-1}\}$  і набуває значення 0 або 1;  $\delta U_i$  – похибка перетворення.

З цих виразів легко визначити вагу  $\Delta U$  одного дискрету вихідної напруги  $U_{вих.i}$ , який відповідає одиниця молодшого цифрового розряду. Якщо відомі

мінімальне  $U_{\min}$  і максимальне  $U_{\max}$  значення вихідної напруги  $U_{\text{вих},i}$ , яка для різного типу  $n$ -розрядного ЦАП може мати різну полярність, то:

$$\Delta U = \frac{|U_{\min}| + |U_{\max}| \mp \delta U_i}{2^{n-1}}. \quad (1.2)$$

Для цього випадку цифровий код на вході ЦАП буде визначатись як:

$$N_2 = \text{int} \left[ \frac{U_i \mp \delta U_i}{\Delta U} + 2^{n-1} \frac{|U_{\min}|}{|U_{\min}| + |U_{\max}|} \right]. \quad (1.3)$$

Основними параметрами ЦАП є динамічний діапазон зміни вхідних та вихідних значень, швидкодія і похибка перетворення.

Динамічні діапазони за входом ( $U_{\max}/U_{\min}$ ) і виходом ( $N_{2\max}/N_{2\min}$ ) при лінійному ЦА-перетворенні мають одне і те саме значення, яке виражають або числом розрядів цифрового коду, або в децибелах, при:  $U_{\min} = 0, N_{\min} = 0$  динамічний діапазон:

$$D = U_{\max} / \delta U = N_{\max} / \delta N, \quad (1.4)$$

де  $\delta U$  і  $\delta N$  – допустимі абсолютні похибки відхилення значень статичної характеристики  $U_{\text{вих}} = f(N_2)$  від лінійного закону.

Швидкодію ЦА-перетворення визначають такі часові параметри:

час перетворення – інтервал часу, протягом якого відбувається акт однозначного перетворення код-аналог;

частота квантування – величина, що обернена періоду квантування, тобто інтервалу часу між сусідніми послідовними перетвореннями.

Статична характеристика трирозрядного ЦАП з використанням прямого коду, що функціонує за наведеною таблицею істинності (табл.1), показана на рис.1.1.

Схеми ЦАП виготовляють здебільшого в інтегральному виконанні, причому з метою використання їх у мікропроцесорній техніці.

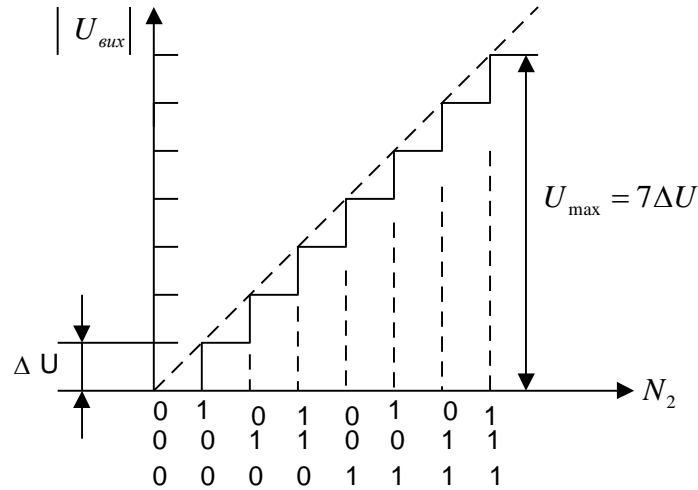


Рисунок 1.1 – Статична характеристика трирозрядного ЦАП.

Серед рівних способів ЦА-перетворення широке використання знайшли ЦАП, спільною ознакою яких в наявність матриці резисторів  $R$  з вихідним (аналоговим) суматором на операційному підсилювачі ОП (рис.1.2). Матриця резисторів призначена для “зваження” цифрового сигналу, який подано паралельним кодом залежно від його двійкового розряду. Через те що при різних способах з’єднання резисторів такі схеми нагадують сходинки, матрицю іноді називають багатоланковою резистивною схемою сходинкового типу. Для реалізації ЦА-перетворення переважно використовують два типи матриці резисторів:

- 1) складеної з двійково-зважених резисторів,
- 2) постійного імпедансу типу  $R - 2R$ .



Рисунок 1.2 – Спрощена структура ЦАП.

Таблиця 1

$X_2$	$X_1$	$X_0$	$U_{\text{вих}}$
0	0	0	0
0	0	1	$1 \Delta U$
0	1	0	$2 \Delta U$
0	1	1	$3 \Delta U$
1	0	0	$4 \Delta U$
1	0	1	$5 \Delta U$
1	1	0	$6 \Delta U$
1	1	1	$7 \Delta U$

CP
MP

## 1.2 ЦАП з широтно-імпульсною модуляцією

Дуже часто ЦАП входить у склад мікропроцесорних систем. В такому випадку, якщо не потрібна висока швидкодія, цифро-аналогове перетворення може бути дуже просто здійснене за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Схема ЦАП з ШІМ наведена на рис.1.3.

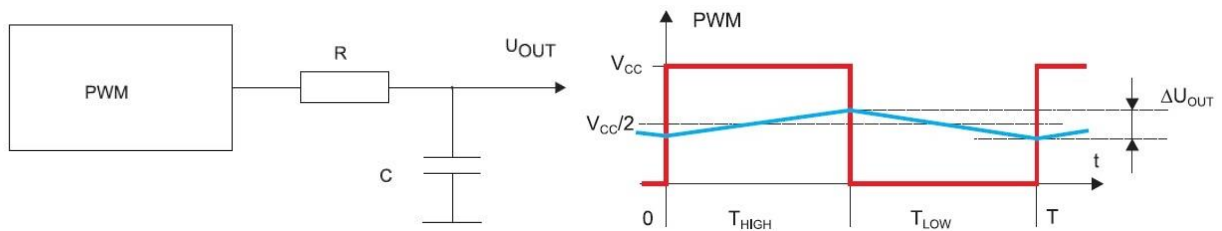


Рисунок 1.3 – Схема ЦАП і сигнал на вході та виході фільтра

Найпростіше організується цифро-аналогове перетворення в тому випадку, якщо мікроконтролер має вбудовану функцію широтно-імпульсного перетворення (на платі Arduino є вбудований ШІМ модулятор). У залежності

від заданої розрядності перетворення (для контролера Arduino режим 8 біт) контролер з допомогою свого таймера/лічильника формує послідовність імпульсів, відносна тривалість яких  $g = t_{\text{та}} / T$  визначається співвідношенням

$$\gamma = \frac{D}{2^N} \quad (1.5)$$

де  $N$  - розрядність перетворення, а  $D$  - перетворюваний код. Фільтр нижніх частот згладжує імпульси, виділяючи середнє значення напруги. У результаті вихідна напруга перетворювача

$$U = \gamma U = \frac{DU}{2^N} \quad (1.6)$$

Розглянута схема забезпечує майже ідеальну лінійність перетворення, не містить прецизійних елементів (за винятком джерела опорної напруги). Основний її недолік - низька швидкодія.

### 1.3. ЦАП на двійково-зважених резисторах.

Це найпростіший щодо будови принципової схеми ЦАП, у якого матриця резисторів складена за принципом адекватного відтворення двійкового коду: номінал кожного резистора – аналог двійкового коду з ряду

$$2^0 R, 2^1 R, \dots, 2^{n-2} R, 2^{n-1} R.$$

Крім матриці двійково-зважених резисторів до схеми даного ЦАП (рис.1.4) входять: суматор на ОП, стабілізоване джерело опорної напруги  $E_0$  і аналоговий мультиплексор, що являє собою комутатор на ключах, які керовані вхідним цифровим (двійковим) кодом  $N_2 = \{X_{n-1} X_{n-2} \dots X_1 X_0\}$ . Матриця резисторів живиться напругою  $E_0$  і залежно від положень ключів, тобто від поданого коду

$N_2$  на вхід аналогового мультиплексора, перетворює  $N_2$  на постійний струм. При нульовому коді  $N_{2\min} = \{00\dots0\}$  (ключі у лівому положенні) у точці  $A$  струм мінімальний і на виході ОП, що грає роль суматора зважених струмів  $I_n, U_{\text{вих}} = 0$ . Якщо на вході ЦАП код  $N_{2\max} = \{11\dots1\}$ , всі резистори матриці запаралелені (ключі у правому положенні) і у точці  $A$  струм  $I_n$  максимальний, що відповідає  $U_{\text{вих}} = U_{\max}$ .

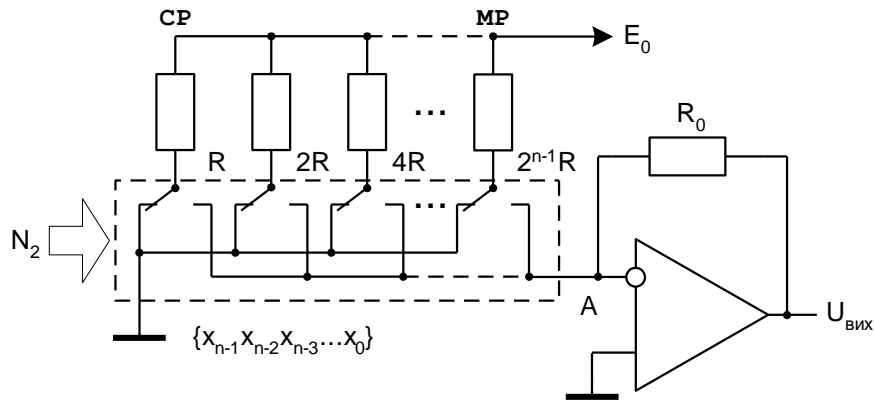


Рисунок 1.4 – ЦАП на двійково-зважених резисторах

Таким чином на виході  $n$ -розрядного ЦАП залежно від вхідного коду  $N_2$  при  $E_0 = \text{const}$  створюється напруга:

$$U_{\text{вих}} = -R_0 I_n = -\frac{R_0}{R_M} E_0, \quad (1.7)$$

де

$$\begin{aligned} \frac{1}{R_M} &= \frac{X_{n-1}}{2^0 R} + \frac{X_{n-2}}{2^1 R} + \dots + \frac{X_1}{2^{n-2} R} + \frac{X_0}{2^{n-1} R} = \\ &= \frac{1}{2^{n-1} R} (2^{n-1} X_{n-1} + 2^{n-2} X_{n-2} + \dots + 2^1 X_1 + 2^0 X_0) = \frac{N_2}{2^{n-1} R} \end{aligned}$$

є еквівалентна провідність матриці резисторів, значення якої залежить від комбінації вхідних змінних  $X_i$ .

Значення одного дискрету напруги даного ЦАП:

$$\Delta U = \left| \frac{U_{BUX}}{N_2} \right| = \left| \frac{R_0}{2^{n-1} R} E_0 \right| = R_0 \Delta I, \quad (1.8)$$

де  $\Delta I$  – значення одного дискрету струму, який визначається найбільшим опором матриці резисторів  $2^{n-1} R$ , тобто молодшим розрядом (МР) ЦАП.

Якщо  $R = R_0$ , то  $\Delta U = E_0 / 2^{n-1}$ , а  $E_0 = U_{\max}$ , що відповідає (7.2) при  $U_{\min} = 0$  і  $\delta U_i = 0$ .

Отже, “вага” одного розряду ЦАП, яка у кінцевому, результаті визначає точність ЦА-перетворення, залежить від розрядності  $n$  ЦАП і коефіцієнта  $K_{UCC}$  підсилення ОП старшого розряду (СР)  $X_0 = 1 (K_{UCC} = R_0 / R)$  при заданому  $E_0 = const$ . Максимальна вихідна напруга ЦАП, при якій  $N_{2\max} = \{1 \dots 1\}$ , буде:

$$U_{\max} = \left| \frac{(2^n - 1) R_0}{2^{n-1} R} E_0 \right|. \quad (1.9)$$

Незважаючи на простоту технічної реалізації схема ЦАП на двійково-зважених резисторах має такі недоліки: по-перше, необхідність точного підбору широкого діапазону резисторів різних номіналів, до того ж з розкидом номіналів опорів, що менше за значення найменшого з них опору  $R$ , по-друге, залежність опорів від температури, що обмежує точність ЦА-перетворення; по-третє, підвищені вимоги до джерела стабілізованої напруги  $E_0$ , яке має працювати у широкому динамічному діапазоні зміни навантаження  $R_M$ .

#### 1.4. ЦАП на основі матриці резисторів R-2R

Принцип роботи цього ЦАП не відрізняється від принципу роботи вже розглянутого ЦАП. Функціонування ЦАП на матриці резисторів  $R - 2R$ . Його відмінність полягає лише у схемі матриці резисторів, яка тут також виконує функцію забезпечення вагового множника на двійкових входах ЦАП. Перевага

матриці типу  $R - 2R$  – у простоті її виготовлення, бо для неї досить мати лише два номінали резисторів  $R$  і  $2R$  замість їх широкого діапазону. Даний тип ЦАП через таку властивість є економічно вигіднішим і тому його матрицю резисторів разом з комутатором на КМОН-ключах виготовляють в інтегральному виконанні.

На рис.1.5 зображено схему  $n$ -розрядного ЦАП з матрицею резисторів  $R - 2R$ , в якій показано можливість застосування ЛЕ 2І як комутаторів рівнів (0 або 1) на розрядових лініях матриці залежно від комбінації вхідного коду  $N_2$ . Тут ОП виконує функцію суматора-підсилювача зважених на резистивному багатоступеневому подільнику та просумованих у точці  $B$  струмів.

Розглянемо роботу ЦАП при дозволяючому рівні  $E_1 = 1$  на об'єднаних входах ЛЕ, на інші входи яких подається двійковий код:  $N_2 = \{X_{n-1} X_{n-2} X_{n-3} \dots X_0\}$ . У даній схемі опорною напругою  $E_0$  – якою живиться матриця  $R - 2R$ , в напруга на виході (одного або більше залежно від  $N_2$ ), ЛЕ при  $X_i = 1$ . Отже, на потенційних виводах резисторів  $2R$ , що приєднані до ЛЕ, відповідно до коду  $N_2$  буде  $E_0 = 1$  при  $X_i = 1$  або  $E_0 = 0$  при всіх  $X_i = 0$ .

При  $N_{2min} = \{000\dots 0\}$  для всіх резисторів  $2R$  з'являється спільна нульова шина (у тому числі і у резистора  $2R$ , що знаходиться між точками  $A$  і  $B$ , бо точка  $B$  має віртуальний нуль ОП). Отже, у точці  $A$  відносно нульового потенціалу еквівалентний спір матриці  $R_M$  дорівнює  $R$ , і оскільки напруга на вході ОП відсутня (нульова),  $U_{вих} = 0$ .

На рис.7.5 розглянуто еквівалентні схеми матриці резисторів  $R - 2R$  для чотирьох різних випадків вхідного коду:

а) для  $N_2 = \{100\dots 0\}$ ,

б) для  $N_2 = \{010\dots 0\}$ ,



в) для  $N_2 = \{001\dots 0\}$ ,

г) для  $N_2 = \{000\dots 1\}$ .

При появі одиниці лише у старшому розряді, тобто при  $X_{n-1} = 1$  (рис.1.6,а) коефіцієнт передачі такої схеми подільника у точці  $A$  дорівнює  $1/3$ . При  $X_{n-2} = 1$  (рис.1.6,б) отримуємо половину коефіцієнта передачі попередньої схеми, тобто  $1/(3 \cdot 2) = 1/6$ , а при  $X_{n-3} = 1$  (рис.1.6,в) – половину від останнього, тобто  $1/(3 \cdot 2 \cdot 2) = 1/12$  тощо. У разі появи молодшого розряду (МР)  $N_2 = \{000\dots 1\}$  на виході ЦАП з'явиться напруга  $\Delta U$ , що відповідає елементарному кванту.

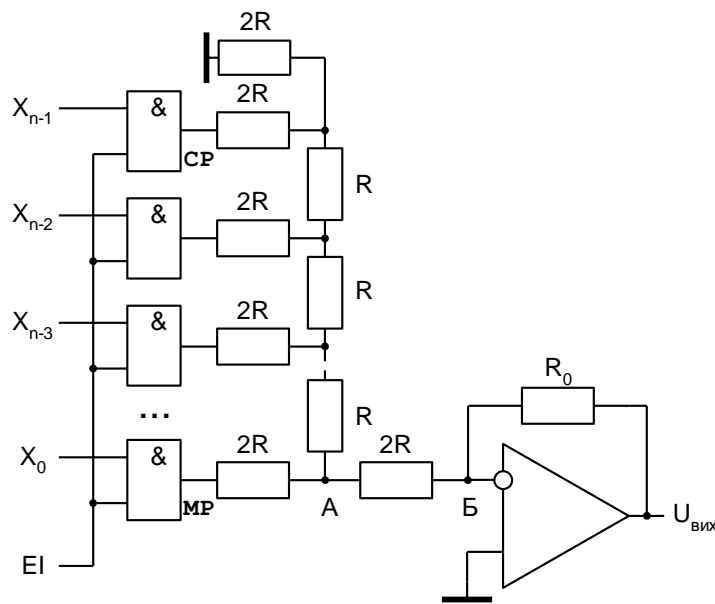


Рисунок 1.5 – ЦАП на матриці резисторів R-2R.

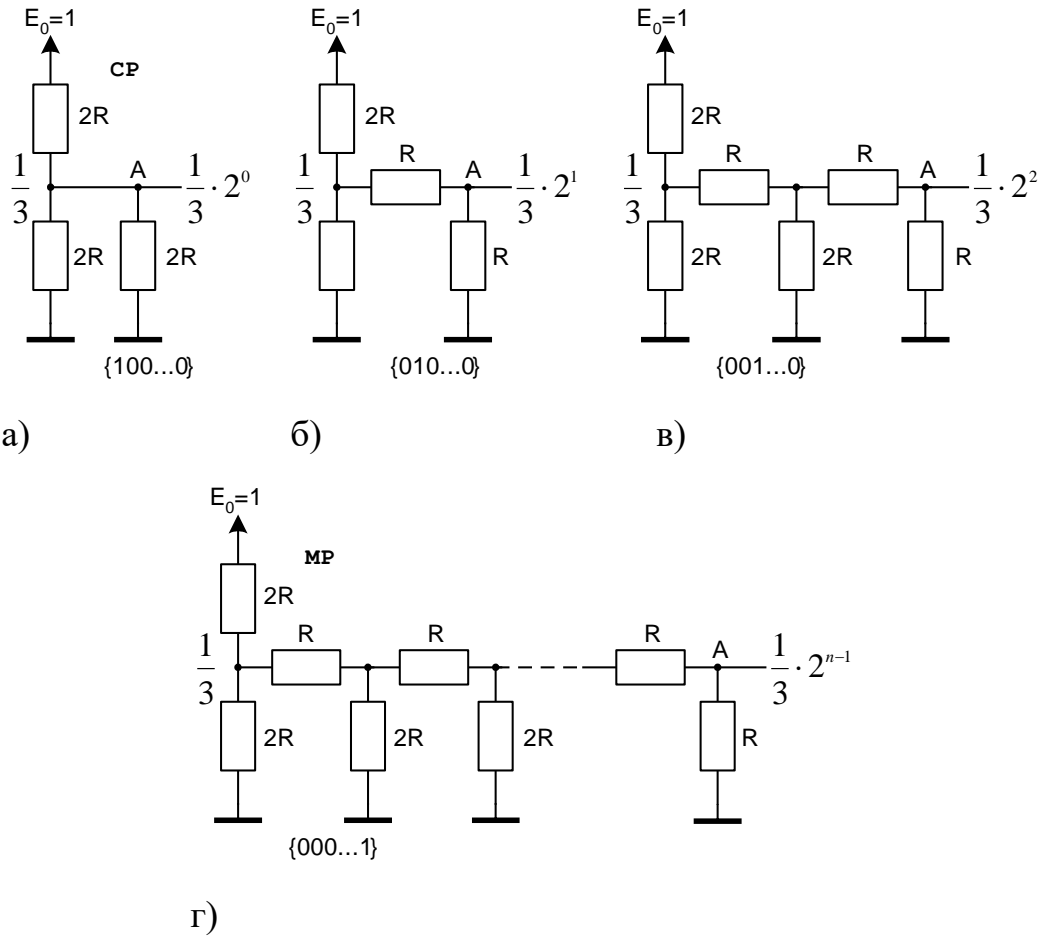


Рисунок – 1.6 Розрахунок матриці резисторів

Отже, у результаті переміщення одиниці від старшого розряду (СР) до молодшого розряду (МР) резистори матриці  $R - 2R$  утворюють числовий (двійковий) ряд розрядів вхідного регістру  $n$ -розрядного ЦАП

$$\frac{1}{3 \cdot 2^0}, \frac{1}{3 \cdot 2^1}, \frac{1}{3 \cdot 2^2}, \dots, \frac{1}{3 \cdot 2^{n-1}},$$

постійним коефіцієнтом якого є число  $1/3$ .

При  $N_{2\max} = \{111\dots 1\}$  еквівалентний опір матриці мінімальний, причому у  $3 \cdot 2^{n-1}$  менший за  $R$ , що забезпечує на виході ЦАП

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{max}} = \left| \frac{(2^n - 1)R_0}{2^{n-1}3R} \right|. \quad (1.10)$$

Таким чином, при  $E_0 = 1$  на виході  $n$ -розрядного ЦАП на основі матриці  $R - 2R$  отримуємо напругу:

$$\begin{aligned}
 U_{\text{вих}} &= -\frac{R_0}{3 \cdot 2^{n-1} R} (2^{n-1} X_{n-1} + 2^{n-2} X_{n-2} + \dots + 2^1 X_1 + 2^0 X_0) = \\
 &= -\frac{R_0}{3 \cdot 2^{n-1} R} N_2, \quad (1.11)
 \end{aligned}$$

а якщо задати  $R = 3R_0$ , то

$$U_{\text{вих}} = |2^{1-n} N_2|. \quad (1.12)$$

Особливістю розглянутої схеми ЦАП з використанням ЛЕ є те, що його швидкодія визначатиметься швидкістю перемикання ЛЕ та значенням паразитних ємностей матриці резисторів. ЦАП даного типу легко реалізувати за допомогою напівпровідникової та гібридної інтегральної технології тому, що матриця  $R - 2R$  займає мінімальну площу на поверхні кристалу і дозволяє знизити до мінімуму розподілені паразитні параметри резисторів та з'єднувальних провідників.

До різновидів ЦАП належать схеми, в яких використовуються комутатори розрядних струмів на активних елементах (генераторах струму), зокрема на біполярних (або КМОН) транзисторах (ключах). Перевагою ЦАП на струмових ключах є висока швидкодія, що зумовлена малими значеннями сталих часу та прискореним перезарядом паразитних ємностей.

## 2 Лабораторна установка

Схема 1

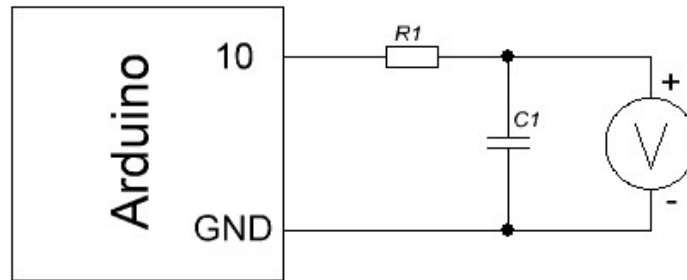
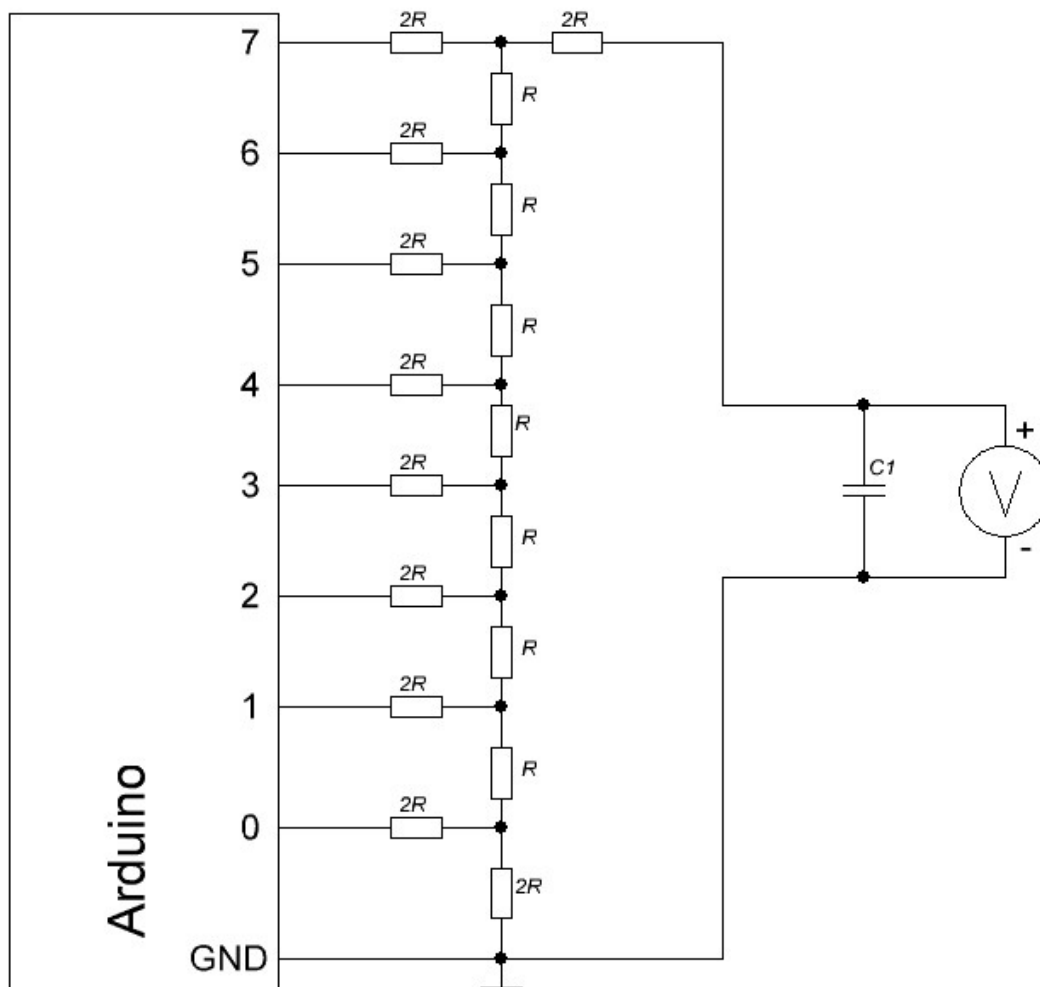


Схема 2



### 3 Хід виконання роботи

- 3.1 Ознайомтесь з лабораторною установкою та додатковими вказівками по роботі з приладами.
- 3.2 Розрахуйте номінал конденсатор низькочастотного фільтра для частоти зрізу 50 Гц, прийнявши опір резистора 1кОм.
- 3.3 Зберіть першу схему, та перевірте правильність. Розрахуйте напругу одного відліку за формулою  $U_{\text{відл}} = \frac{U_{\text{опорна}}}{2^{\text{Розрядність ЦАП}}}$ .
- 3.4 Розрахуйте кількість відліків для напруг в діапазоні 0-5 В та занесіть їх в таблицю.
- 3.5 Напишіть програму в Arduino IDE, яка буде формувати ШІМ сигнал на 10 піні. Використовуйте для цього функцію analogWrite(), змінюйте аргумент, відносно до кожного розрахункового значення. Після кожної зміни вносіть виміряну напругу вольтметром до відповідної колонки.
- 3.6 Зберіть другу схему, напишіть програму в Arduino IDE, яка буде двійковий код на цифрових пінах 0-7, пін 0 – молодший біт, 7 – старший біт. Використовуйте для цього функцію digitalWrite(), змінюйте значення, відносно до кожного розрахункового значення. Після кожної зміни вносіть виміряну напругу вольтметром до відповідної колонки.

№ п/п	Кількість відліків	ЦАП з використанням ШІМ		ЦАП з використанням R2R	
		Розрахункова напруга, В	Напруга на вольтметрі, В	Розрахункова напруга, В	Напруга на вольтметрі, В

## **4 Розрахункове завдання**

Розрахункове завдання – див. п. 3.2, п. 3.3, п. 3.4 та п. 3.5.

## **5 Вимоги до звіту**

Звіт з лабораторної роботи повинен містити:

1. Коротке описання мети і методики проведення роботи.
2. Перелік використаних приладів та матеріалів.
3. Таблиці результатів вимірювань, графічне оформлення.
  1. табличних даних по п.3.4.
  4. Результати вимірювань по пп. 3.4, 3.6.
  5. Програмний код із середовища Arduino IDE з коментарями.
  6. Розрахункове завдання.
  7. Висновки.

## **6 Контрольні питання**

1. Що означає термін ЦАП?
2. Які бувають види ЦАП?
3. Що означає термін квантування?
4. Теорема Котельнікова-Найквіста?
5. Що таке частота дискретизації?
6. Що означає поняття опорна напруга?
7. Де використовуються ЦАП?
8. Що таке квантування?
9. Чи залежить полоса пропускання від частоти дискретизації, чому?
10. Як працює R2R матриця?