

Основи сучасної електроніки

Доцент кафедри ядерної
фізики
Єрмоленко Руслан
Вікторович

Етапи розвитку електроніки

Одна з найперших електронно-обчислювальних машин США ENIAC мала

- 18 тисяч електровакуумних приладів (для їх охолодження використовувалась спеціальна установка);
- вага складала десятки тон;
- для розташування ЕОМ було необхідне приміщення площею 200м²,
- для живлення – електрична потужність 200 кВт.

Сучасні комп'ютери, маючи значно більше можливостей, вільно розташовуються на письмовому столі і є невід'ємними атрибутами життя сучасного суспільства. Такий стрибок у розвитку обчислювальної техніки стався завдяки революції в електроніці в останні 50 - 60 років.

Етапи розвитку електроніки

- **Перший етап**

Початком першого етапу – вакуумної електроніки – вважають 1907 рік, коли американським ученим Л. Форестом був створений підсилювальний електровакуумний прилад – тріод. Цей винахід дав поштовх до розвитку радіотехніки, радіолокації, телебачення, обчислювальної техніки. За відносно короткий проміжок часу були розроблені електровакуумні прилади різного призначення. Проте, незважаючи на низку безперечних переваг, у більшості випадків вони не могли задовольнити нові вимоги до електронної апаратури щодо: надійності, споживання електричної потужності, терміну служби, ваги та габаритів. Останнє особливо важливе для електроніки літальних апаратів.

Етапи розвитку електроніки

Другий етап

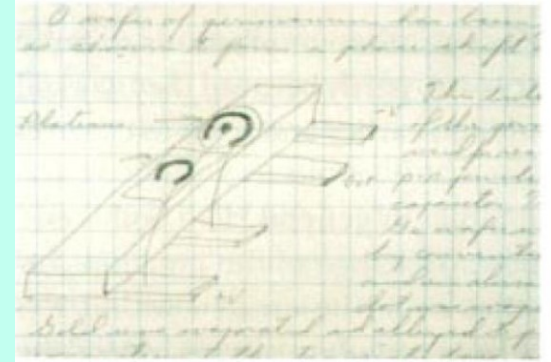
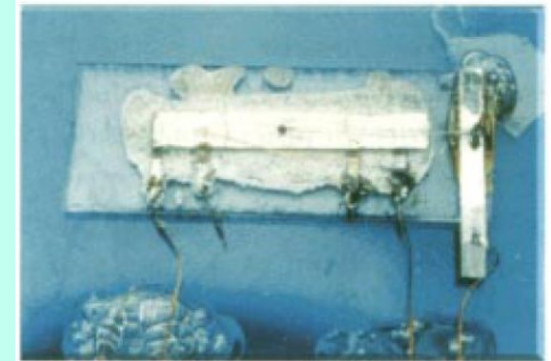
Другий етап розвитку дискретної твердотільної електроніки пов'язують з винаходом у 1947 році американським ученим У. Браттейном і Д. Бардіним під керівництвом В. Шоклі напівпровідникового підсилювального приладу, який вони назвали **транзистором**.

Навіть перші зразки транзисторів вражали фахівців малими розмірами і затратами спожитої енергії порівняно з електровакуумними приладами, які на той час широко використовувались. Винахід транзистора зробив революцію в електроніці. За цей винахід Браттейну, Бардіну і Шоклі у 1956 р. було присуджено Нобелівську премію. Слідом за транзистором було зроблено багато інших напівпровідникових дискретних приладів: різні класи діодів, тиристорів, польових транзисторів, приладів оптоелектроніки.

Етапи розвитку електроніки

- Третій етап

Третій етап - народження мікроелектроніки пов'язують зі створенням 1958 року Дж. Кілбі і Р. Нейсом першої мікросхеми. Мікроелектроніка за короткий час пройшла шлях від малих інтегрованих схем з рівнем інтеграції 10^2 елементів на одній кристалічній пластині до надвеликих інтегрованих схем з рівнем інтеграції більше за 10^8 елементів на одній пластині. Розміри окремих елементів складають долі мікрона. Сучасні технології дозволяють на одному кристалі формувати найскладніші багатофункціональні електронні пристрої і системи. Можна стверджувати, що сучасна електроніка – це в основному електроніка інтегрованих мікросхем. Лише завдяки розвитку мікроелектроніки з'явилась можливість створити супер-ЕОМ, здійснювати космічні польоти, досліджувати інші планети.



Перша мікросхема та її опис в робочому журналі (генератор)

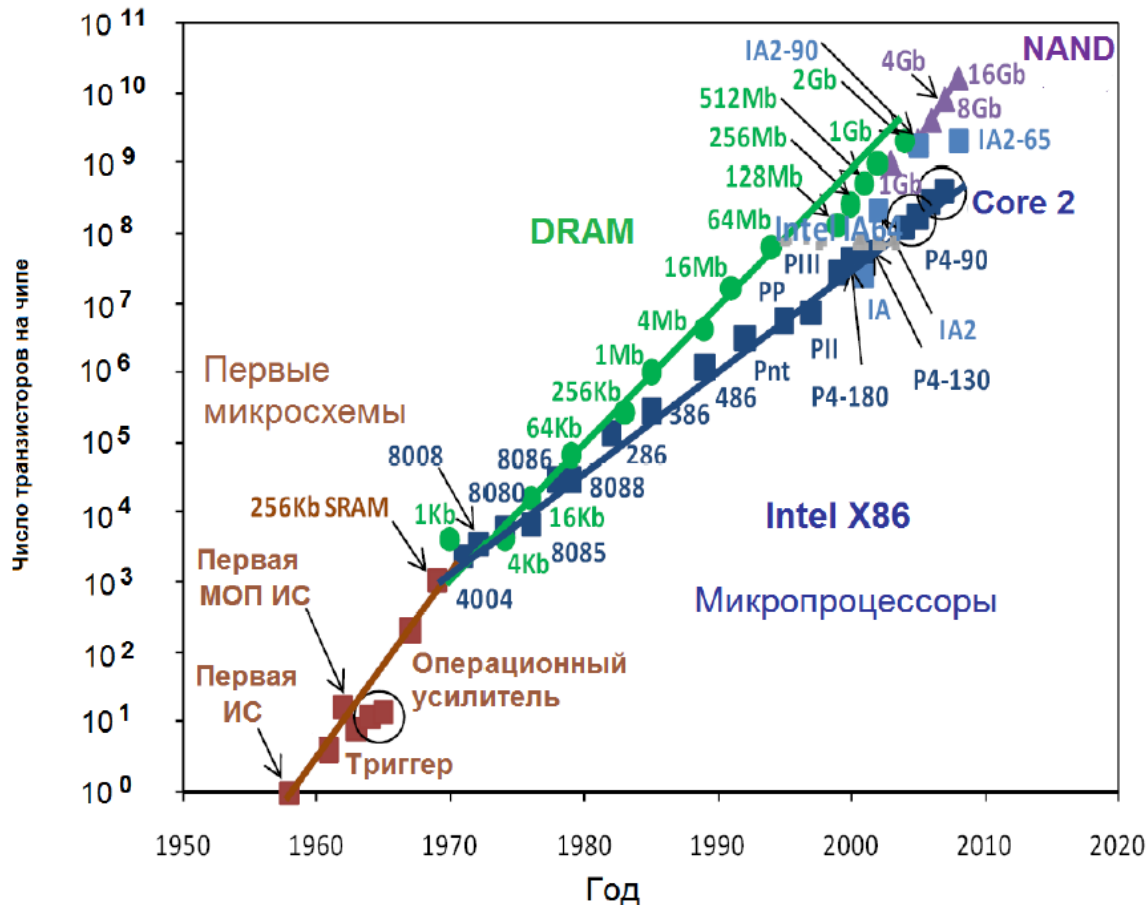
Етапи розвитку електроніки

Четвертий етап

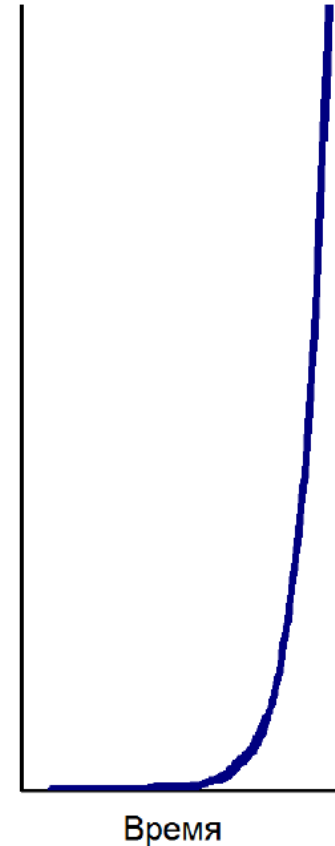
Намагання зменшити розміри активних елементів мікросхем спонукало до зародження нового етапу електроніки – **наноелектроніки**. Ми живемо в час переходу від субмікронних до нанометрових розмірів елементів інтегрованих схем. Зменшення розмірів до нанометрів зумовило появу нових квантово-розмірних ефектів, які можна використовувати для створення більш сучасних приладів та пристроїв електроніки. Проте деякі задачі сучасної електроніки (наприклад, розпізнавання мови і візуальних образів) потребують настільки великих обчислювальних потужностей, що дослідники займаються пошуками нових можливостей і розробкою приладів на принципово нових фізичних явищах.

Одна з таких можливостей пов'язана з тим, що електрон – це не просто заряджена частинка, а частинка, яка має внутрішній момент кількості руху – спін, і пов'язаний з ним магнітний момент. Електрон може знаходитись удвох спінових станах, які умовно називають “спін угору” і “спін униз”. Цими станами можна кодувати біти інформації: один стан відповідає “1”, а другий “0”. Існують і інші радикальні альтернативи розвитку наноелектроніки, із яких слід в першу чергу виділити молекулярну електроніку і біоелектроніку. Методи сучасної електроніки знайшли широке застосування в наукових дослідженнях. Народився, зокрема, і такий напрямок, як ядерна електроніка. Вона забезпечила розвиток ядерно-фізичного експерименту, ядерних технологій та широко застосовується в фізиці високих енергій.

Закон Мура



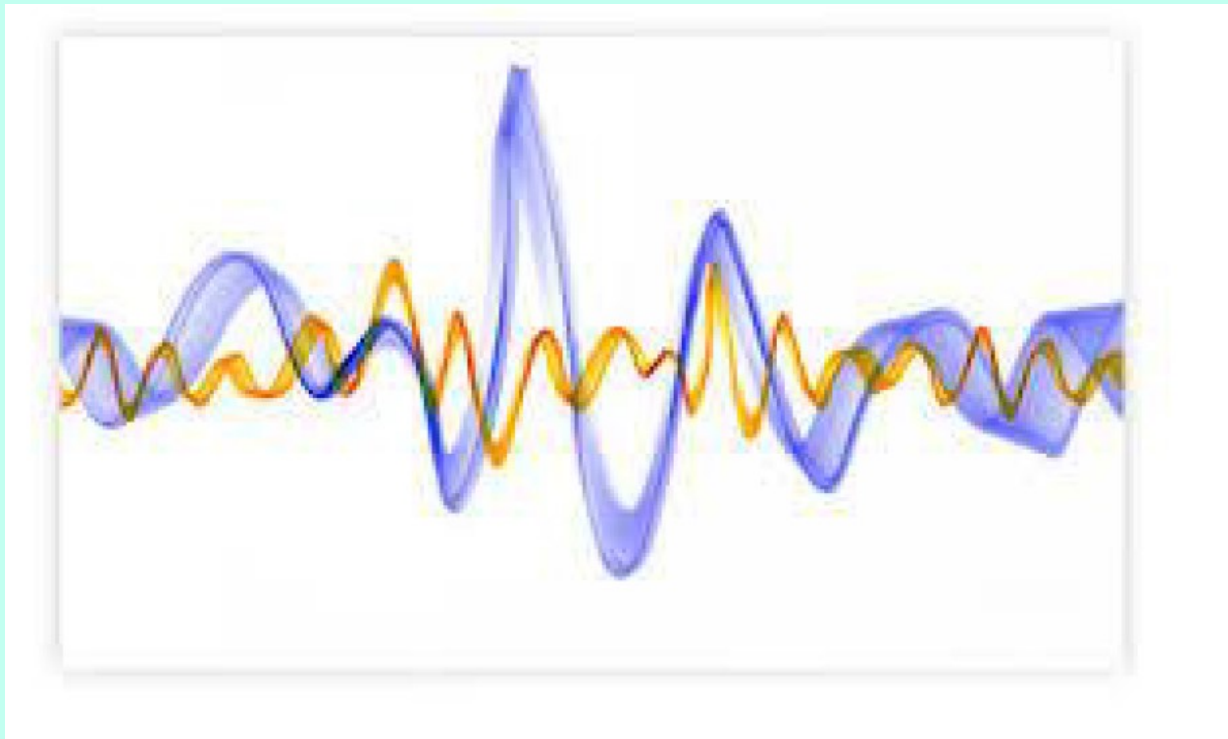
Число транзисторов на одном кристалле



Число компонентів на інтегральних мікросхемах
подвоюється кожні 18-24 місяці

Електричні сигнали

- **Сигнал** - залежність електричної напруги (струму) від часу, що містить наступні компоненти:
 - а) однозначно-визначена вимірюваними фізичними величинами - ІНФОРМАЦІЯ;
 - б) стохастична - ШУМ;
 - в) стаціонарна або залежна від історії сигналу - перешкода.



Електричні сигнали

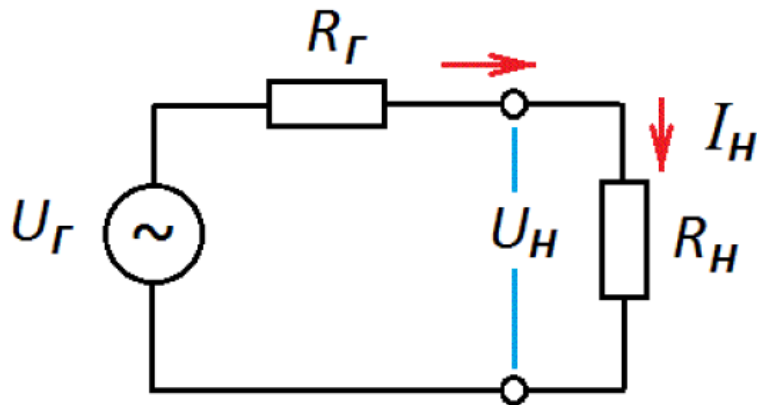
Вимірювальні перетворювачі - клас пристроїв, що перетворюють фізичні величини в сигнал. Інформація на виході вимірювального перетворювача може бути пов'язана не тільки з миттєвим значенням напруги (струму), але і з амплітудою коливань деякої частоти, інтегралом за деякий час, частотою, середньоквадратичним значенням, фазою та іншими параметрами.

У техніці фізичного експерименту за деякими вимірювальними перетворювачами закріпилася назва "детектор", наприклад, НПД - **НапівПровідниковий Детектор** іонізуючих випромінювань.

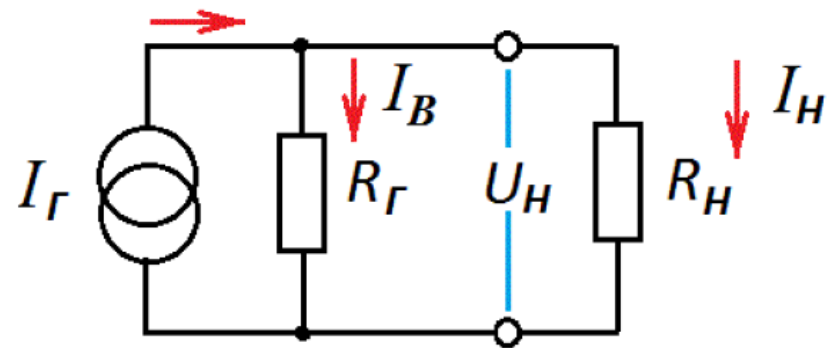
Електричні сигнали

Будь-які джерела сигналів можна описати за допомогою **еквівалентної схеми – генератора сигналу**.

В залежності від конкретної задачі використовують один з двох типів генераторів: генератор напруги або генератор струму.



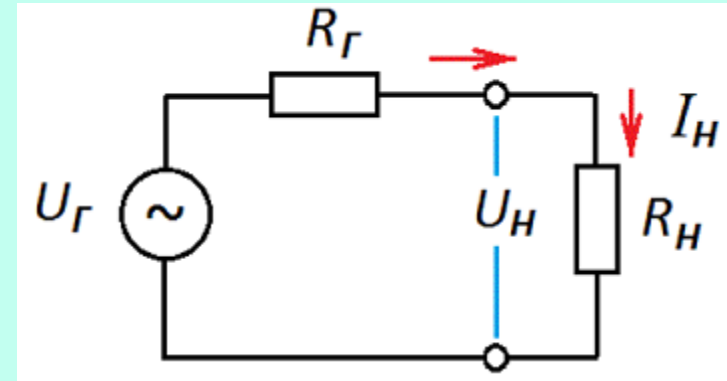
Генератор напруги



Генератор струму

Електричні сигнали

Для генератора напруги мають місце такі співвідношення:



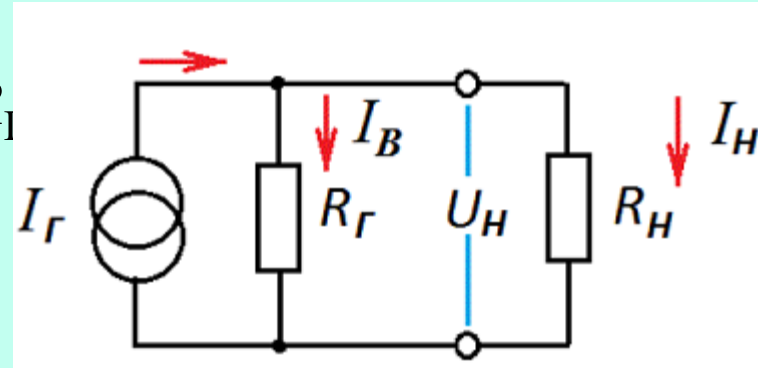
$$I_H = \frac{U_G}{R_G + R_H},$$

$$U_H = I_H * R_H = \frac{U_G R_H}{R_G + R_H},$$

тобто в ідеальному генераторі напруги внутрішній опір має наближатися до нуля $R_G \rightarrow 0$, при цьому вся напруга генератора буде надходити на опір навантаження. В реальних генераторах напруги бажано, щоб $R_G \ll R_H$. Генератор напруги описує джерело, напруга якого не залежить від опору навантаження.

Електричні сигнали

В генераторі струму розгалужується саме струм – частина проходить через внутрішній опір генератора R_{Γ} а частина через опір навантаження. Тобто можна записати:



$$U_H = I_{\Gamma} \frac{R_H R_{\Gamma}}{R_H + R_{\Gamma}},$$

а струм , що проходить через опір навантаження буде :

$$I_H = \frac{U_H}{R_H} = I_{\Gamma} \frac{R_{\Gamma}}{R_H + R_{\Gamma}} = I_{\Gamma} \frac{1}{1 + R_H / R_{\Gamma}}$$

Весь струм генератора буде протікати через опір навантаження, якщо внутрішній опір генератора струму буде йти до нескінченності $R_{\Gamma} \rightarrow \infty$. Генератор струму описує джерело, струм якого не залежить від опору навантаження.

Електричні сигнали

Взагалі електричні сигнали $U(t)$ можуть мати найрізноманітніший характер. Звичайно їх поділяють на три групи:

- ✓ періодичні,
- ✓ неперіодичні
- ✓ статистичні.

Періодичні сигнали : $U(t)=U(t \pm nT)$,

де T - період, n – ціле число ($n = 1, 2, 3 \dots$).

До найпростіших періодичних сигналів відносяться гармонічні коливання:

$$U(t) = U_0 \sin(\omega t + \varphi) \text{ або } U(t) = U_0 \cos(\omega t + \varphi), \quad \omega = 2\pi f = 2\pi/T.$$

Тут U_0 – амплітуда (вольти), ω – циклічна частота (радіан/сек),
 φ – початкова фаза.

Електричні сигнали

Складні періодичні сигнали з періодом T_1 за допомогою формалізму Фур'є розкладають в ряди по гармоніках:

$$U(t) = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(\omega_1 n t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(\omega_1 n t)$$

Тут

$$a_n = \frac{2}{T_1} \int_0^{T_1} U(t) \cos(\omega_1 n t) dt$$

$$b_n = \frac{2}{T_1} \int_0^{T_1} U(t) \sin(\omega_1 n t) dt.$$

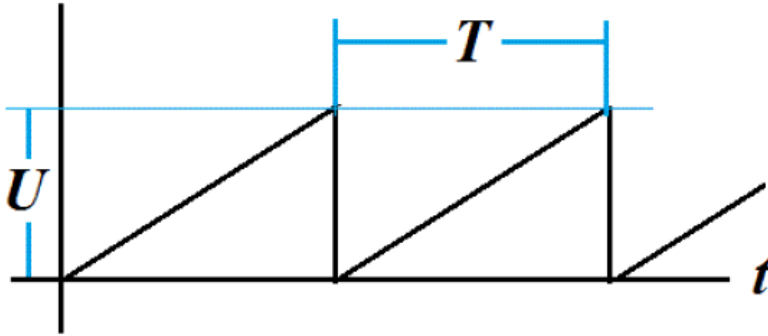
Або

$$U(t) = U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} U_n \cos(\omega_1 n t - \varphi_n)$$

Де $U_0 = a_0/2$, $U_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$, $n = 1, 2, 3 \dots$

Таким чином маємо можливість аналізувати складні сигнали аналізуючи їх гармонічні складові.

Електричні сигнали



Графік залежності напруги сигналу від часу.

$$U(t) = \frac{U}{2} - \frac{U}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin(n\omega_0 t)$$

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$$

Його розклад в ряд Фур'є демонструє спектральний склад сигналу (лінійчатий спектр).

З розкладу в ряд видно, що сигнал складається з синусоїд з дискретними частотами $\omega_0, 2\omega_0, 3\omega_0, \dots$, амплітуди яких зменшуються як $1/n$. Це лінійчатий спектр.

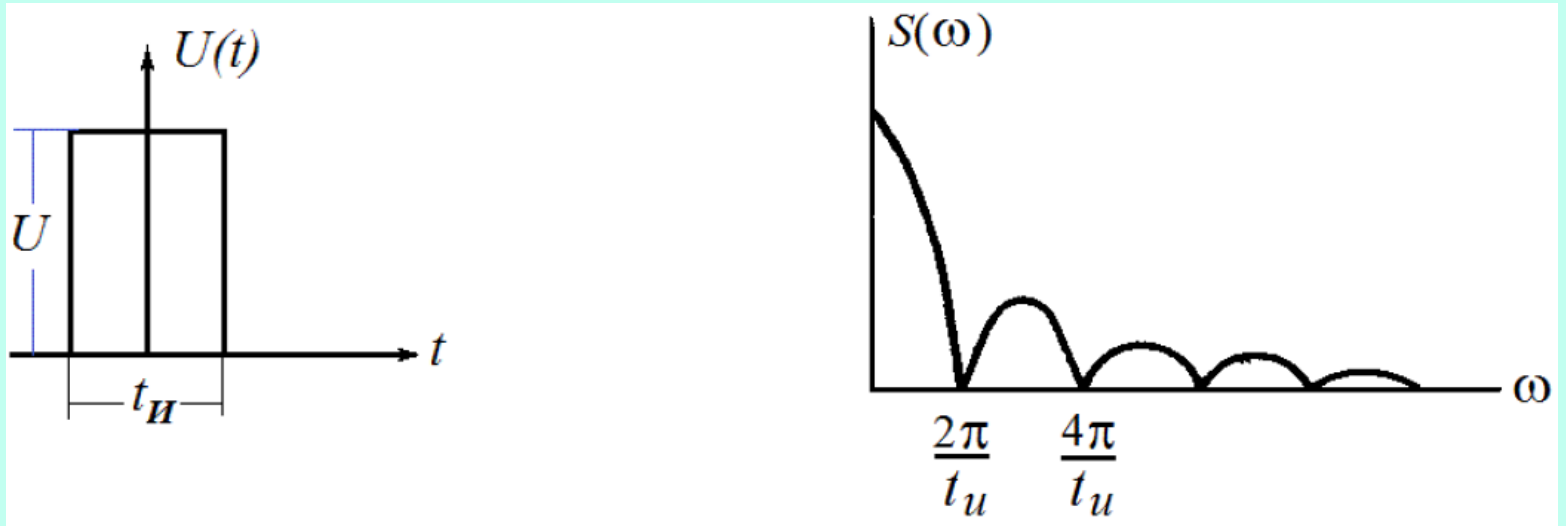
Електричні сигнали

Неперіодичний сигнал (наприклад один прямокутний імпульс) матиме неперервний спектр, який визначається інтегралом Фур'є. Дійсно, неперіодичний сигнал можна розглядати як деяку періодичну функцію, яка має період, що наближається до нескінченності. В цьому випадку розглянута нами вище періодична послідовність імпульсів перейде в одиночний імпульс, тобто сигнал стане неперіодичним. Для знаходження його спектра ми повинні перейти від спектра періодичного до спектру неперіодичного сигналу. При збільшенні періоду T до нескінченності величина $\omega = 2\pi/T \rightarrow 0$ прагне стати нескінченно малою. Це означає, що інтервали між лініями спектру за шкалою частот нескінченно малі, тобто ці лінії як би зливаються, і спектр стає суцільним.

Електричні сигнали

Як приклад розглянемо один прямокутний імпульс тривалістю t_u .

Відомо, що спектр такого сигналу має вигляд:

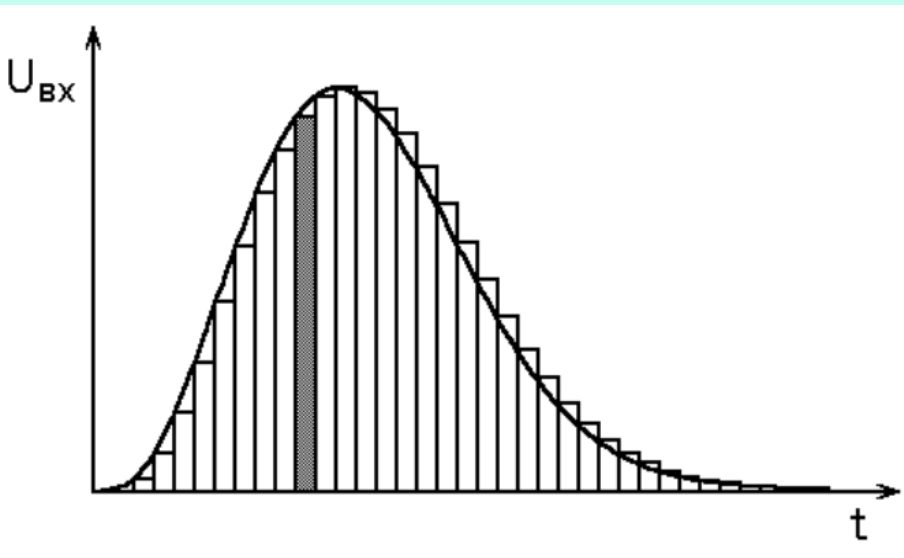


Неперіодичний сигнал – один прямокутний імпульс.

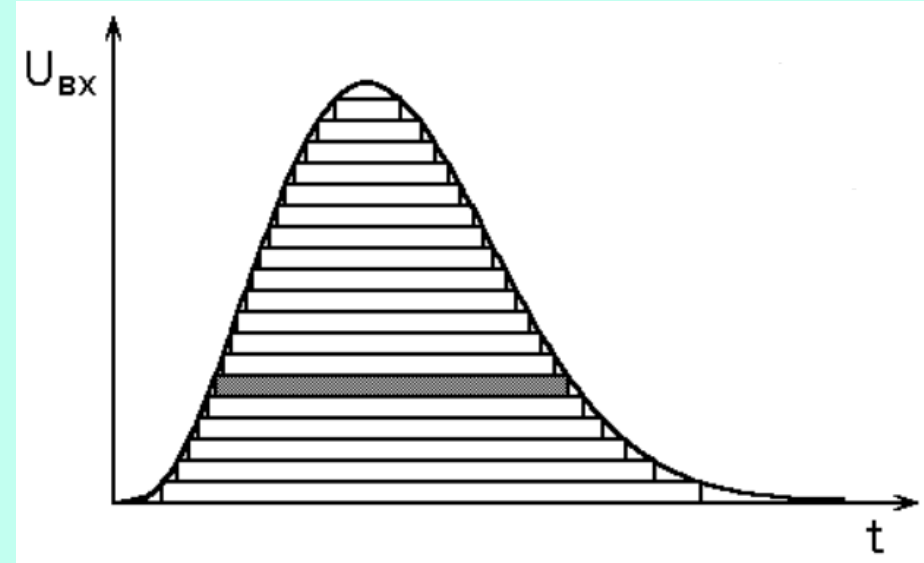
Спектр частот одного прямокутного імпульсу.

Електричні сигнали

Електричні сигнали можуть бути представлені не лише як сума гармонічних функцій. Сигнал можна представити у вигляді суми коротких імпульсів або суми сходинок:



Представлення сигналу у вигляді коротких імпульсів



Представлення сигналу у вигляді сходинок

Електричні сигнали

Сигнали з детекторів ядерного випромінювання

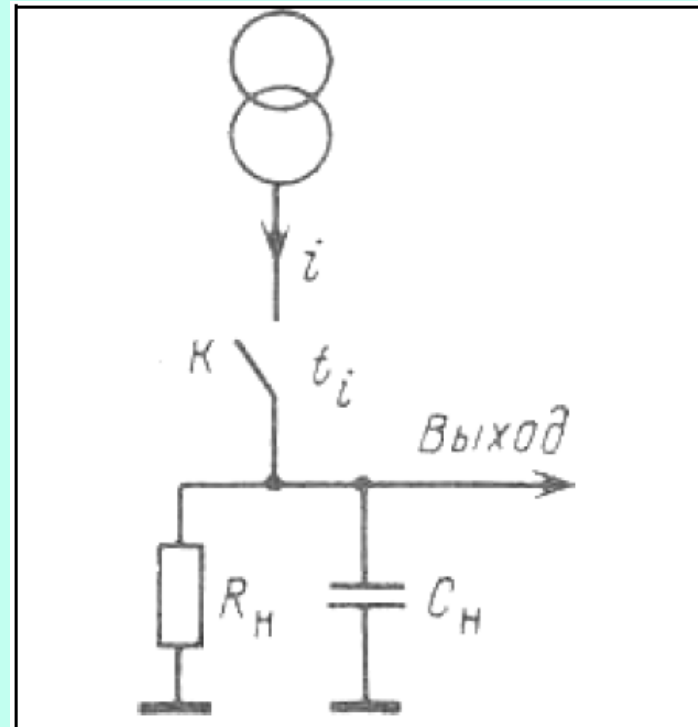
Процес розпаду радіоактивних ядер носить випадковий (статистичний) характер. **Тобто випадковими є практично всі параметри ядерного випромінювання: тип і енергія частинок, момент їх появи, часові інтервали між ними.** Додаткові невизначеності виникають завдяки складним механізмам взаємодії ядерного випромінювання з речовиною детекторів. Відповідно і сигнали від детекторів ядерного випромінювання мають випадковий характер, що і обумовлює специфічні особливості ядерної електроніки.

Незважаючи на різноманітність фізичних принципів реєстрації частинок різними типами детекторів, на виході багатьох детекторів з електричним зніманням інформації виникає електричний сигнал певного значення та тривалості, що несе всю доступну інформацію.

Електричні сигнали

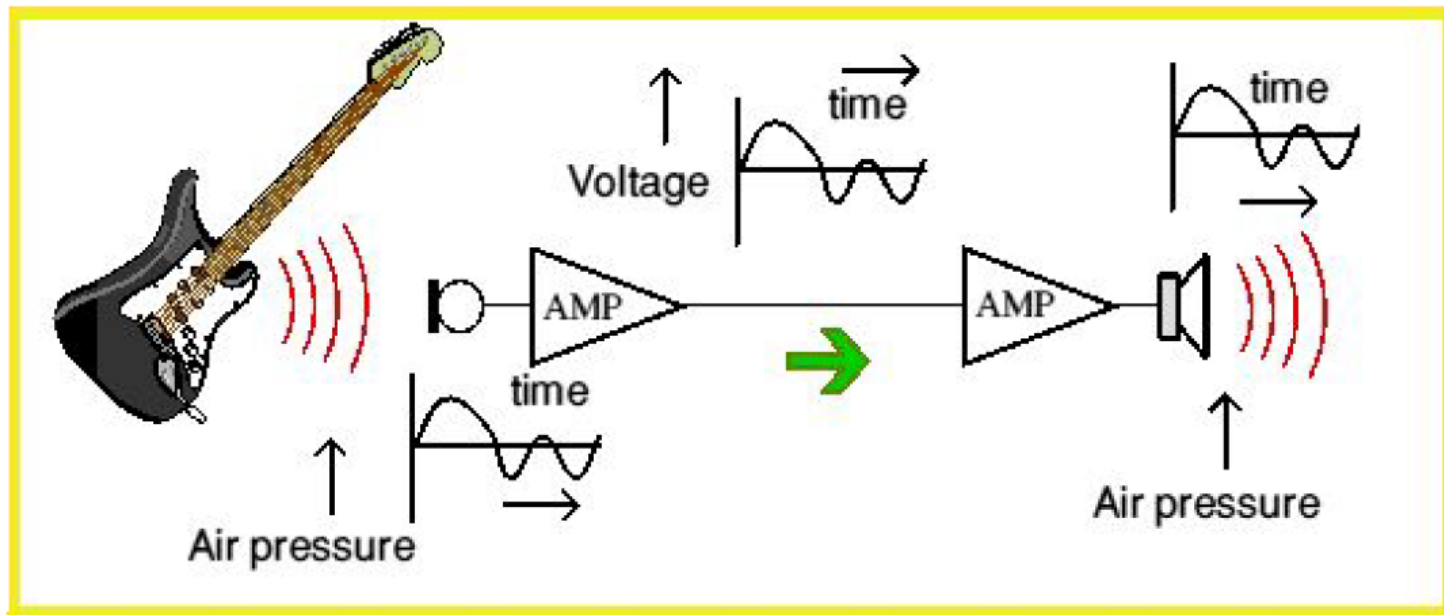
Тому з формальної точки зору будь який детектор із згаданих вище може розглядатися як генератор струму, який надходить в зовнішній ланцюг для реєстрації. Для формального аналізу процесу формування та передачі вихідного сигналу детектор може бути представлений у вигляді еквівалентної схеми генератора струму.

Електрична еквівалентна
схема підключення
детектора (генератор
струму)

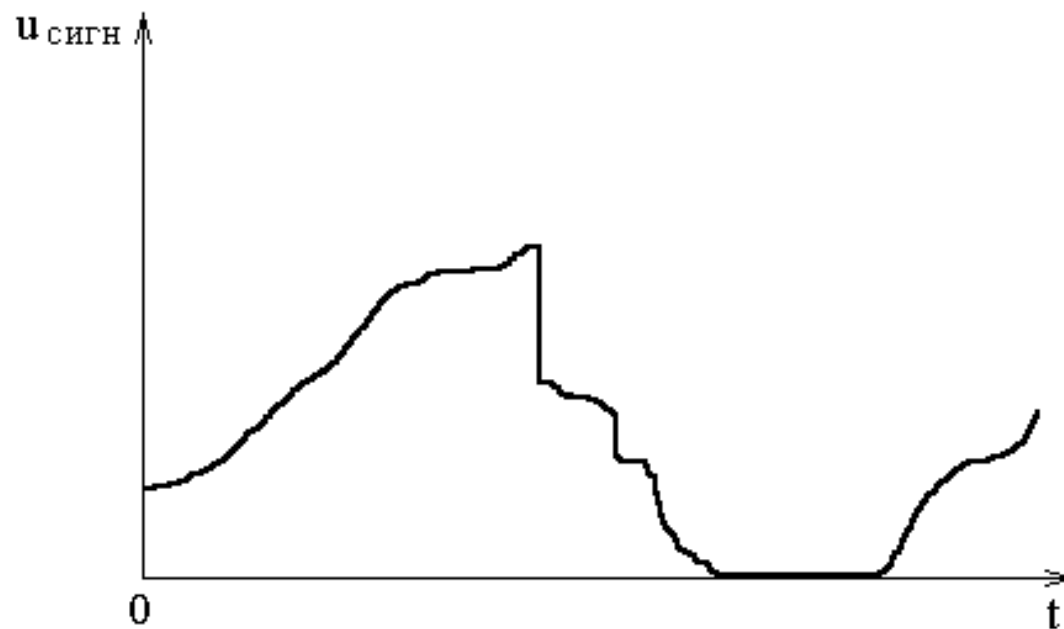


Електричні сигнали

Аналоговий сигнал

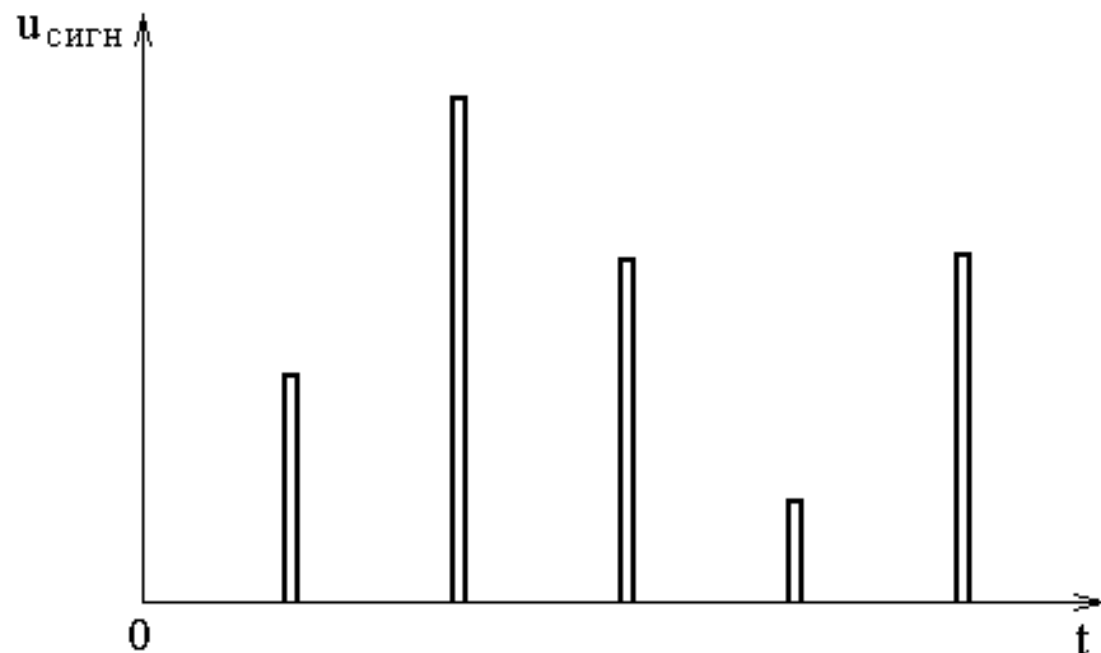


Аналоговий сигнал довільний по часу та амплітуді



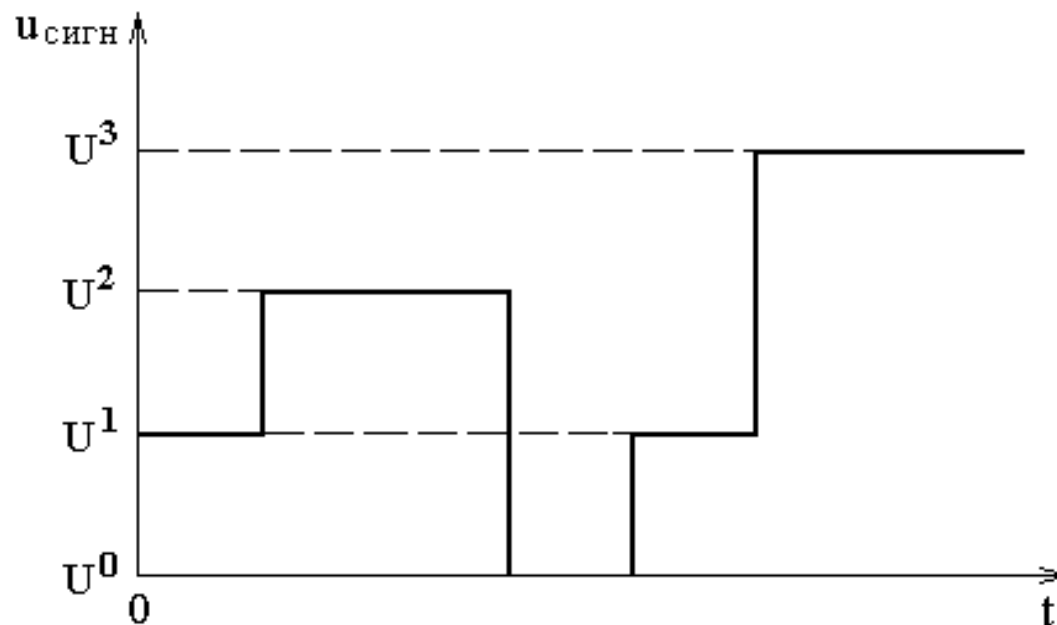
[назад](#)

Сигнали, довільні по величині та дискретні по часу



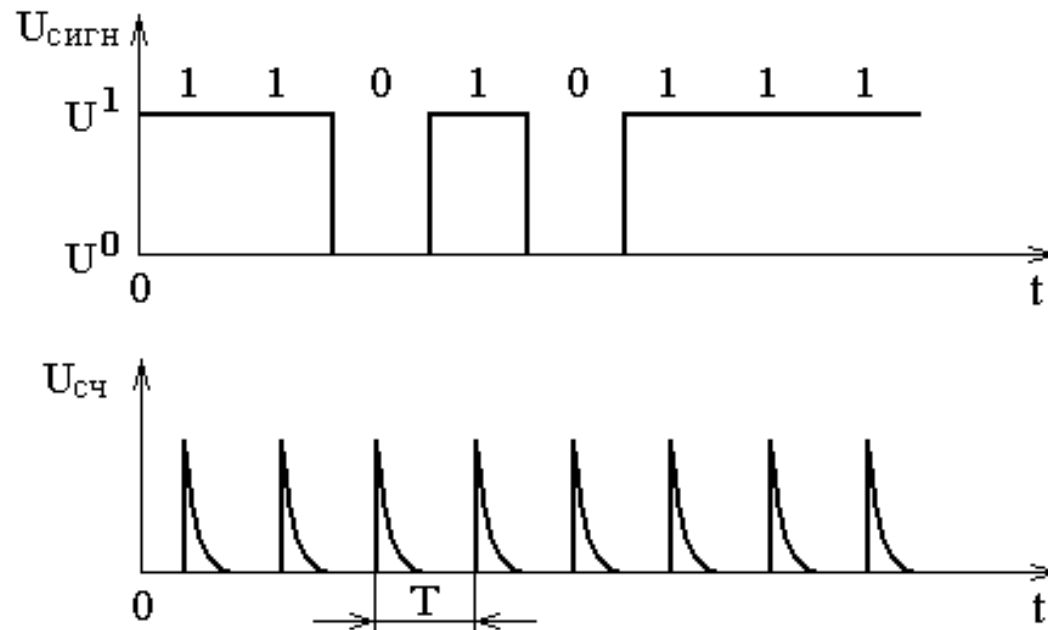
[назад](#)

Квантовані за значенням та довільні в часі



[назад](#)

Цифрові сигнали квантовані по величині та дискретні в часі

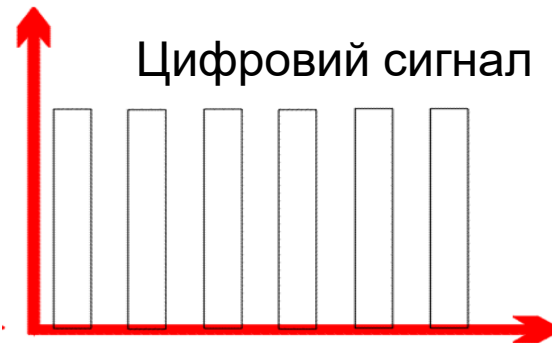
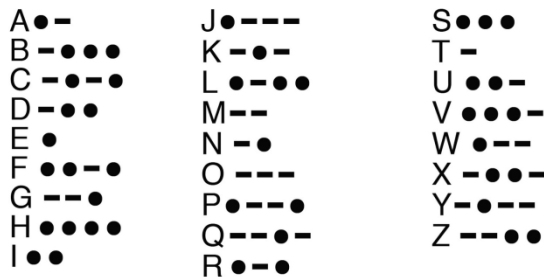
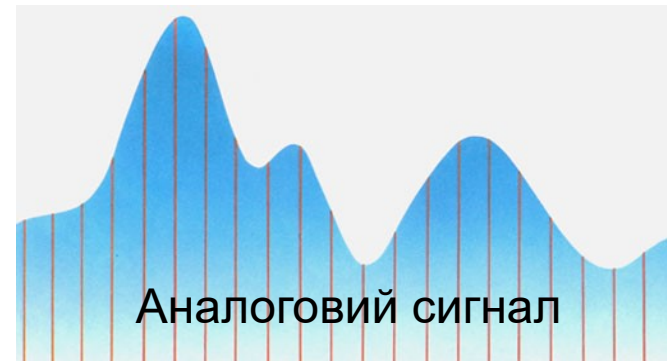
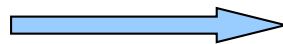


Основний недолік аналогового сигналу -

принципова незахищеність від впливу перешкод. Тобто, при обробці аналогового сигналу відношення сигнал / перешкода (сигнал / шум) може тільки погіршитися.

Цифрові сигнали

Якщо проводити аналогії між видами азбуки та сигналами, то:



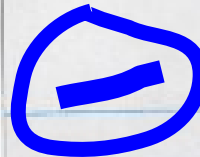
Цифровий сигнал — електричний сигнал, який описується дискретною функцією часу (дискретний сигнал)

Цифровий сигнал має два логічних стани — **0** та **1**. Кожному із цих станів відповідає певний рівень напруги.

Цифрові сигнали



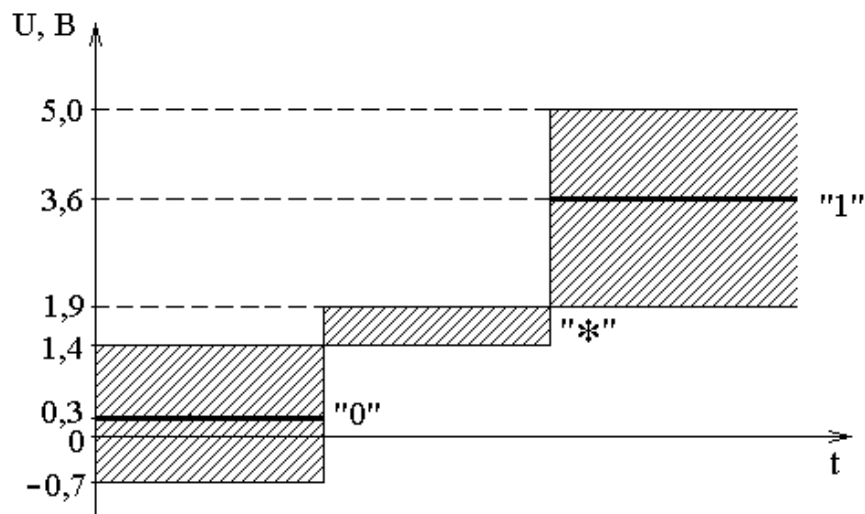
- Все, що над шумовим прогом, читається, як «чистий» сигнал
- Несприятливий до невеликих коливань амплітуди сигналу
- На цифровому сигналі легше будувати логіку
- Цифрова інформація краще зберігається



- Всі сигнали в природі — аналогові. Завжди треба робити перетворення
- Аналоговий сигнал має більше характеристик — його легше розпізнати в умовах високого фону
- Цифрові пристрої повільніші за аналогові

У цифрових сигналах введені спеціальні зони (області допустимих значень), значення сигналів в яких або рівнозначні (незалежно від величини зони), або не можуть існувати взагалі.

Наприклад, в транзисторних-транзисторної логіки (ТТЛ) введено такі допустимі області значень сигналів:



Номинальні значення сигналів для ТТЛ: $U_{\text{НОМ}}^1 = 3,6 \text{ В}$, $U_{\text{НОМ}}^0 = 0,3 \text{ В}$;

проте будь-яке значення сигналу в інтервалі від 1,9 В до 5 В буде сприйнято, як логічна "1", в інтервалі від $\square 0,7$ В до 1,4 В - як логічний "0". Заборонений інтервал значень сигналів від 1,4 В до 1,9 В ("*"). Якщо сигнал потрапляє в цей інтервал, то він може бути сприйнятий і як логічний "0", і як логічна "1", що призведе до збою роботи обчислювальних пристроїв.

Іншою перевагою цифрового сигналу є те, що кожен цикл обробки спрямовує його значення до номінального значення.

Наприклад, на вхід пристрою поступив сигнал $U'_{\text{ВХ}} = 2,1 \text{ В}$

На виході пристрою сигнал приймає значення: $U'_{\text{ВЫХ}} = 3,5 \text{ В}$

Тобто, при обробці цифрових сигналів відношення сигнал / перешкода (сигнал / шум) не погіршується, а, як правило, покращується.

Отже,

***цифровий сигнал має значно більшу
Захищеність від завад, ніж аналоговий.***

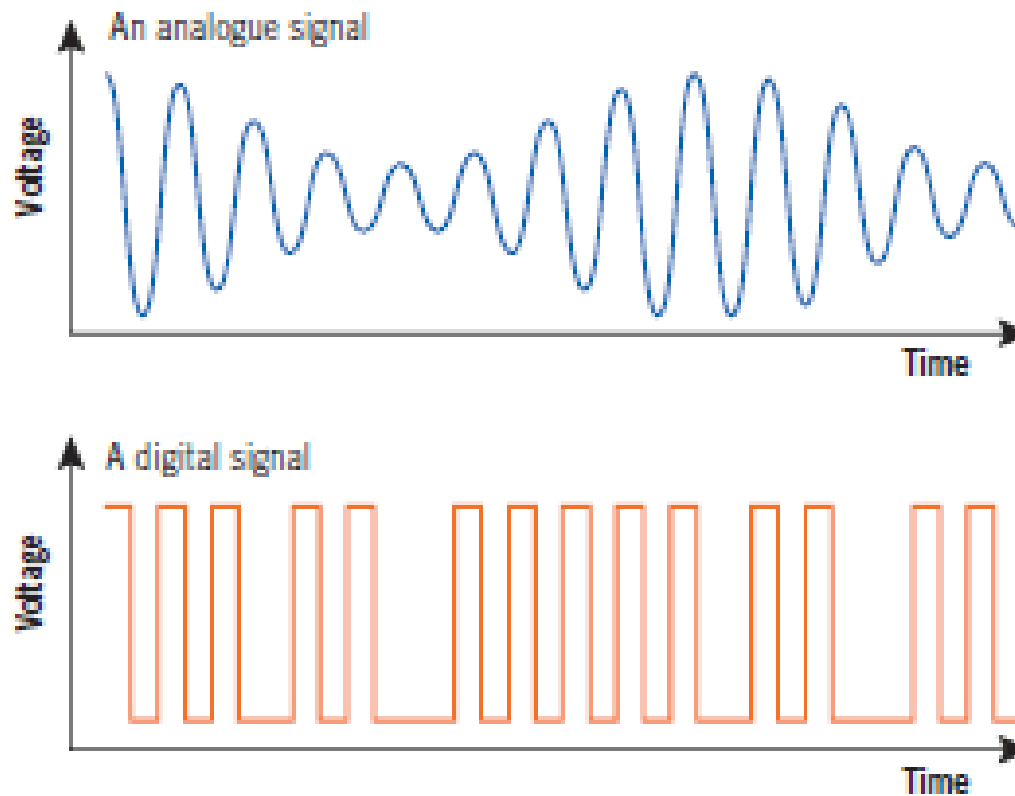
Тому в сучасних електронних пристроях аналогові сигнали часто обробляються цифровими методами.

<https://youtu.be/j7-acuTio4M>

<https://youtu.be/vFk2MiHRlQo>

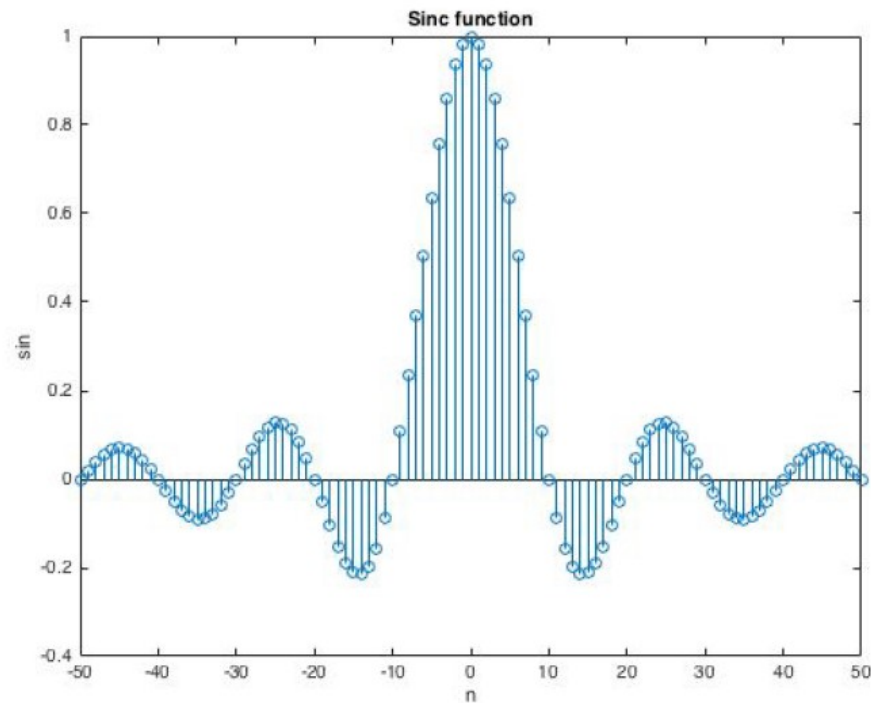
Електричні сигнали

Analogue and digital signals



Електричні сигнали

Оцифрування аналогового сигналу



Пасивні двополюсники

Резистор

Зв'язок між струмом і напругою визначається законом Ома:

$$U_R = RI$$

Тут U – напруга на виводах резистора (одиниця виміру - вольт), R – активний опір (одиниця виміру - Ом), I – струм (одиниця виміру - ампер).

У випадку змінного струму :

$$I = I_0 \sin(\omega t)$$

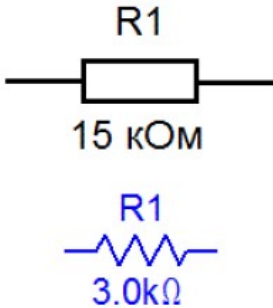
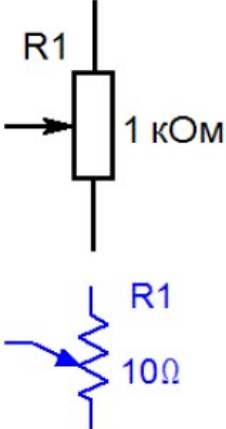
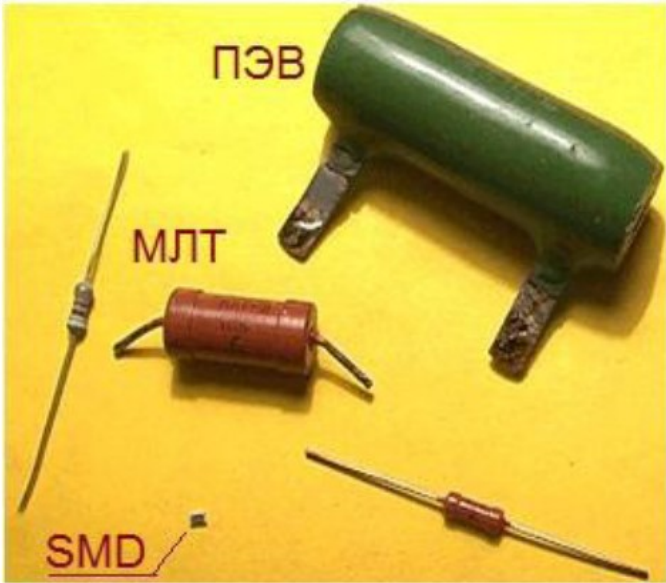

Напруга на резисторі матиме вигляд:

$$U_R = RI_0 \sin(\omega t) = U_0 \sin(\omega t)$$

Тобто для активного опору нема зсуву фаз між струмом і напругою, а опір резистора в певних межах не залежить від частоти.

Пасивні двополюсники

Умовні позначення і зовнішній вигляд резисторів

	Постійні резистори	Змінні резистори
Умовні позначення на електричних схемах		
Зовнішній вигляд (SMD - surface mounting device – мініатюрні резистори для монтажу на поверхні друкованих плат).		

Пасивні двополюсники

Промисловість виготовляє велику кількість резисторів для найрізноманітніших застосувань. Основні параметри резисторів:

- Величина опору $\sim 10^{-4} < R < 10^{12}$ Ом;
- Допустима потужність $\sim 10^{-2} < P = UI < 10^3$ Вт;
- Гарантована точність $\sim 10^{-2} \% < \Delta R/R \cdot 100\% < 30\%$;
- Залежність від температури визначає термічний коефіцієнт опору (ТКР);
- Частотні властивості – для роботи на високих частотах необхідно зменшувати паразитну ємність та індуктивність резистора, що досягається особливостями конструкції.

Пасивні двополюсники

Конденсатор.

Зв'язок між струмом і напругою визначається інтегралом:

$$U_C = \frac{1}{C} \int I(t) dt$$

Тут C – ємність (одиниця виміру - фарад).

Якщо струм змінюється в часі за законом синуса

$$I = I_0 \sin(\omega t)$$

То напруга на конденсаторі матиме вигляд:

$$U_C(t) = \frac{1}{C} \int I_0 \sin(\omega t) dt = -\frac{1}{\omega C} I_0 \cos(\omega t)$$

Величина $\frac{1}{\omega C}$ має розмірність опору, тобто опір ємності залежить від частоти струму. Він позначається як $Z_C = \frac{1}{\omega C}$.

Також спостерігається зсув фаз $\varphi = -\pi/2$ між струмом і напругою (напруга відстає від струму).





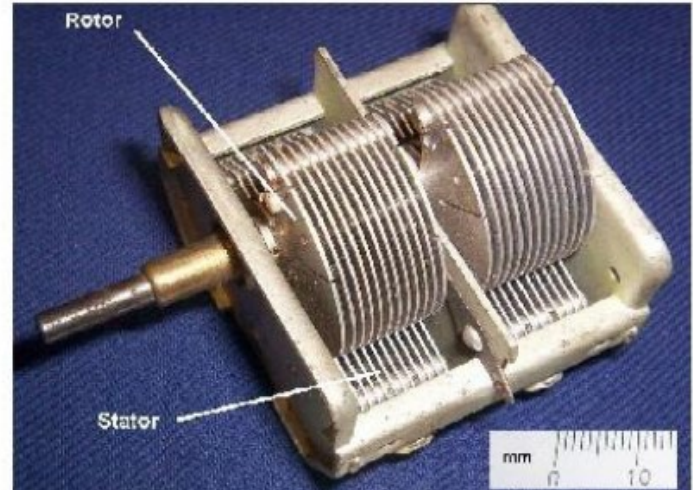
Пасивні двополюсники

Основні параметри конденсаторів

- Ємність $\sim 10^{-13} < C < 1$ фаради;
- Робоча напруга $\sim 5 < U_{\text{робоча}} < 10^5$ вольт;
- Коефіцієнт температурної нестабільності (ТКЕ);
- Максимальна робоча частота.

Пасивні двополюсники

Умовні позначення та фото деяких типів конденсаторів.

Умовне позначення на схемах	Зовнішній вигляд деяких типів конденсаторів
<p data-bbox="270 442 695 628">$C1$  3.0nF Постійний</p> <p data-bbox="251 671 830 856">$C2$  0.1uF-POL Електролітичний</p> <p data-bbox="270 899 656 1099">$C3$  30pF Змінний</p>	<p data-bbox="966 399 1642 442">Керамічний Високовольтний</p>  <p data-bbox="1004 742 1603 799">SMD Електролітичний</p>  <p data-bbox="1004 828 1062 856">Rotor</p> <p data-bbox="1043 1228 1101 1256">Stator</p> <p data-bbox="1429 1256 1622 1313">mm 0 10</p>

Пасивні двополюсники

Індуктивність (котушка індуктивності).

Зв'язок між струмом і напругою визначається явищем електромагнітної індукції і має такий вигляд:

$$U_L = L \frac{dI}{dt}$$

Якщо струм змінюється в часі за законом синуса

$$I = I_0 \sin(\omega t)$$

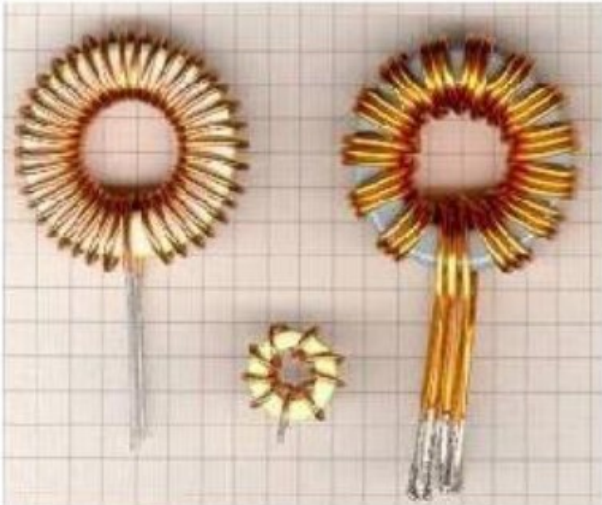
То напруга на індуктивності матиме вигляд:

$$U_L(t) = L \frac{d}{dt} I_0 \sin(\omega t) = \omega L I_0 \cos(\omega t) = \omega L I_0 \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

Величина ωL має розмірність опору, тобто опір індуктивності залежить від частоти струму. Він позначається як $Z_L = \omega L$. Також спостерігається зсув фаз $\varphi = \pi/2$ між струмом і напругою (напруга випереджає струм).

Пасивні двополюсники

Умовні позначення та фото деяких котушок.

	Умовне позначення	Зовнішній вигляд
Постійна котушка індуктивності	$\begin{array}{c} L1 \\ \text{---} \text{m} \text{---} \\ 51\text{mH} \end{array}$	
Котушка з можливістю зміни індуктивності	$\begin{array}{c} L2 \\ \text{---} \text{m} \text{---} \\ 10\text{mH-VAR} \end{array}$	