

## 8.2 Próbkowanie i konwertery C/A i A/C

### 1. Układy próbkująco-pamiętające

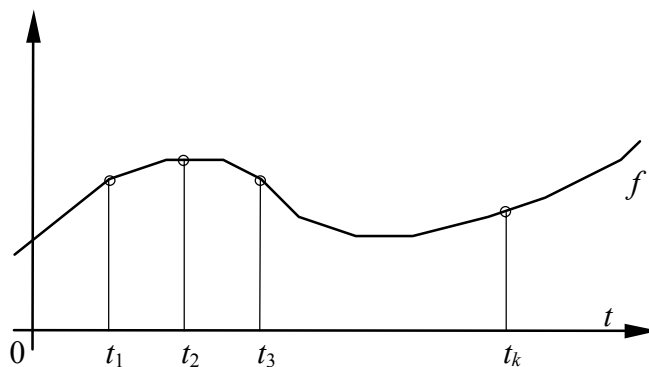
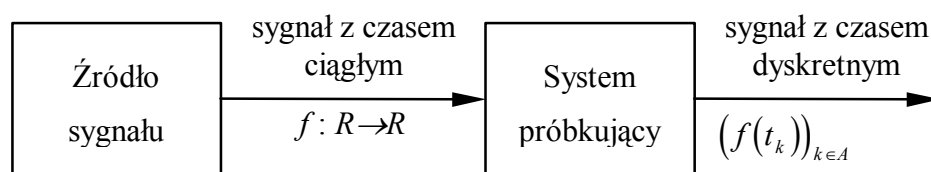
*Układy próbkująco-pamiętające* (ang. *sample&hold*) pobierają próbkę sygnału wejściowego i pamiętają ją aż do następnego próbkowania (por. rys.1.). Dla zagadnień związanych z próbkowaniem zasadnicze jest następujące twierdzenie o próbkowaniu:

**Twierdzenie** (Kotelnikowa-Shannona o próbkowaniu):

Niech dla pewnych liczby rzeczywistych dodatnich  $\omega_g$  i  $T$  oraz funkcji rzeczywistej  $f \in C(R)$  (funkcja ciągła), takiej że  $f \in L^1(R, l_1)$  (funkcja całkowalna), spełnione będą warunki  $\frac{2\pi}{T} \geq 2\omega_g$  oraz  $\text{supp } \hat{f} \subset [-\omega_g, \omega_g]$  (gdzie  $\hat{f}$  jest transformatą Fouriera funkcji  $f$ ). Wówczas dla każdego  $t \in R$  mamy

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} f(k \cdot T) \frac{\sin(\omega_g(t - kT))}{\omega_g(t - kT)} \quad (*)$$

Zbieżność szeregu (\*) jest zbieżnością punktową.

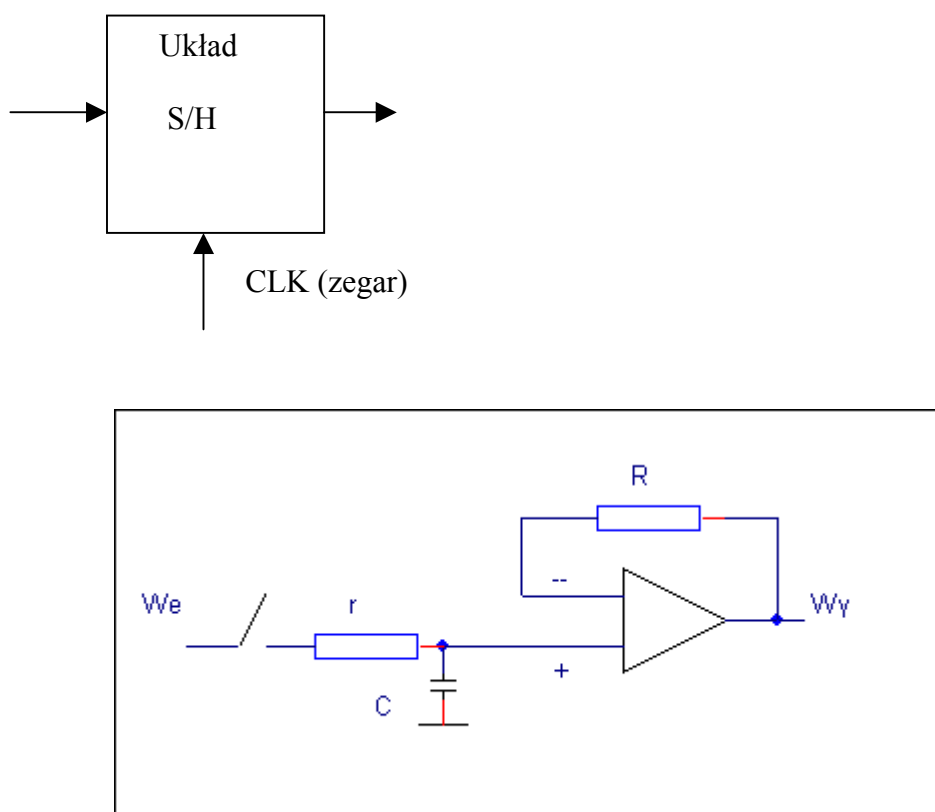


Rys.1. Próbkowanie jednowymiarowego sygnału deterministycznego

Podobne twierdzenie można sformułować dla sygnałów losowych, a dokładniej dla procesów stochastycznych stacjonarnych w szerszym sensie.

Sens praktyczny powyższego twierdzenia jest taki, że przy spełnieniu pewnych warunków dotyczących sygnału (sygnałem jest funkcja  $f$ ) potrafimy odtworzyć sygnał w dowolnym punkcie pobierając próbki sygnału dostatecznie gęsto. Niewiarygodne, przecież pomiędzy chwilami próbkowania sygnału nie oglądamy! No tak ale założenia o funkcji  $f$  są mocne,

bardzo mocne. Częstotliwość, z którą trzeba co najmniej próbować sygnał  $f$ , żeby móc odzyskać funkcję  $f$ , nazywa się częstotliwością Nyquista.

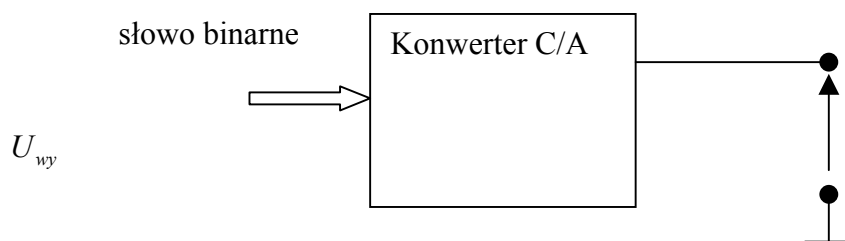


Rys. 2. Prosty układ próbkująco pamiętający a) oznaczenie schematowe b) rozwiązanie układowe

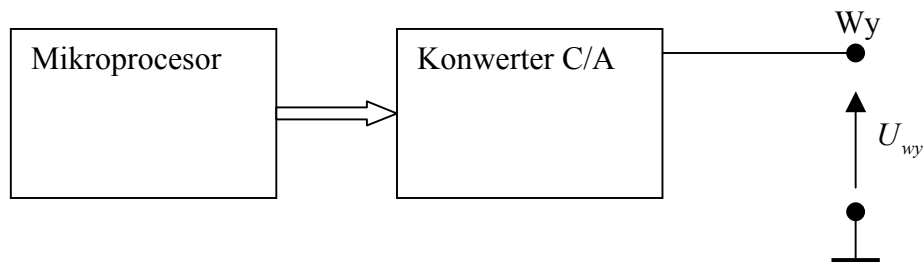
## 2. Konwertery cyfrowo-analogowe

*Przetworniki cyfrowo-analogowe* czyli *konwertery C/A* (ang. *Digital to Analog Converters*, w skrócie *D/A*) służą do zamiany słowa binarnego w ustalonym kodzie numerycznym - np. NKB - na odpowiadającą temu słowu wartość napięcia (por. rys 3.).

Konwertery C/A znajdują zastosowanie w komputerowych systemach pomiarowych, cyfrowym przetwarzaniu sygnałów, sprzęcie audio i automatyce.



Rys.3. Konwerter C/A

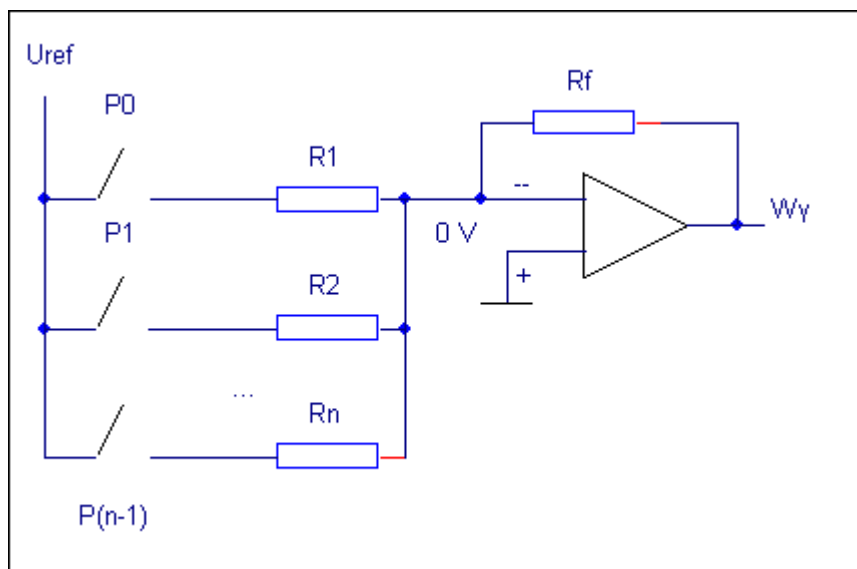


**Rys.4. Współpraca mikroprocesora z przetwornikiem C/A; na wyjściu układu możemy mieć podłączoną np. żarówkę, grzałkę czy silnik elektryczny; zmieniając słowo binarne przesyłane do konwertera zmieniamy np. szybkość obrotową silnika elektrycznego**

Prosty przetwornik cyfrowo-analogowy wykorzystujący sumator na wzmacniaczu operacyjnym pokazany jest na rys. 5. Zasada jego działania wynika wprost z zasady działania sumatora. Zakładamy, że oporniki dołączone do węzła „-” wzmacniacza operacyjnego mają wartości  $R_1 = R$ ,  $R_2 = 2R$ ,  $R_3 = 4R, \dots$ ,  $R_n = 2^{n-1} R$ . Klucze P0, P1, ..., P(n-1) sterowane są bitami przetwarzanego słowa binarnego  $a_{n-1}, a_{n-2}, \dots, a_0$ . Jedynek włącza klucz, zero wyłącza.  $U_{ref}$  oznacza napięcie referencyjne, czyli napięcie wzorcowe.

Wadą układu są duże różnice wartości oporników  $R_1, R_2, \dots, R_n$ . Napięcie na wyjściu układu jest równe

$$U_{wy}(a_{n-1}, a_{n-2}, \dots, a_0) = -U_{ref} \frac{R_f}{R} \sum_{i=0}^{n-1} a_i \cdot 2^i$$



**Rys. 5. Prosty konwerter C/A**

Innym (częściej stosowanym) układem przetwornika C/A jest tzw. przetwornik drabinkowy.

### 3. Konwertery analogowo-cyfrowe

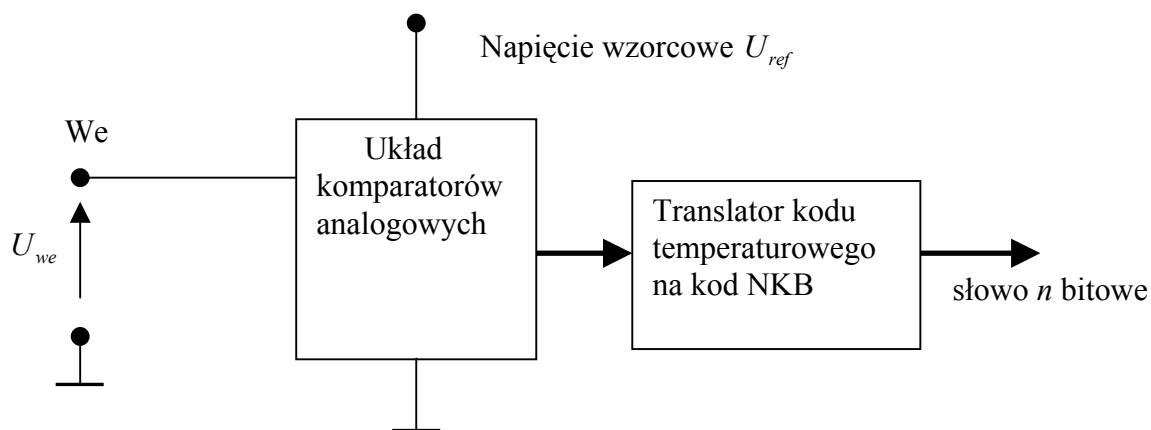
*Przetworniki analogowo-cyfrowe*, czyli *konwertery A/C* albo konwertery D/A (ang. *Digital to Analog Converters*), służą do zamiany wartości analogowej napięcia na słowo binarne reprezentujące w ustalonym kodzie numerycznym wartość napięcia wejściowego. Mówimy, że konwerter jest  $n$ -bitowy, jeśli słowo wyjściowe konwertera jest  $n$ -bitowe.

Konwertery A/C znajdują zastosowanie w komputerowych systemach pomiarowych, cyfrowym przetwarzaniu sygnałów, sprzęcie audio i automatyce.

Koncepcyjnie najprostszym przetwornikiem A/C jest układ z bezpośrednim porównaniem nazywany również *konwerterem typu flash*. Układy tego typu należą do najszybszych. Typowy czas konwersji dla takiego układu jest rzędu 10 ns. Zasada działania jest następująca: Załóżmy dla uproszczenia, że napięcie wejściowe  $U_{we}$  jest nieujemne i mniejsze równe od napięcia referencyjnego. Napięcie wejściowe podawane jest na układ  $2^n$  komparatorów i porównywane równoległe z pośrednimi napięciami wzorcowymi

$$U_{ref,k} = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{ref}}{2^n} + k \frac{U_{ref}}{2^n}$$

uzyskanymi z dzielnika oporowego. Na wyjściu układu komparatorów analogowych pojawia się słowo kodowe  $2^n$  bitowego kodu temperaturowego, które translator kodu zamienia na odpowiadające mu słowo  $n$ -bitowe w kodzie NKB.

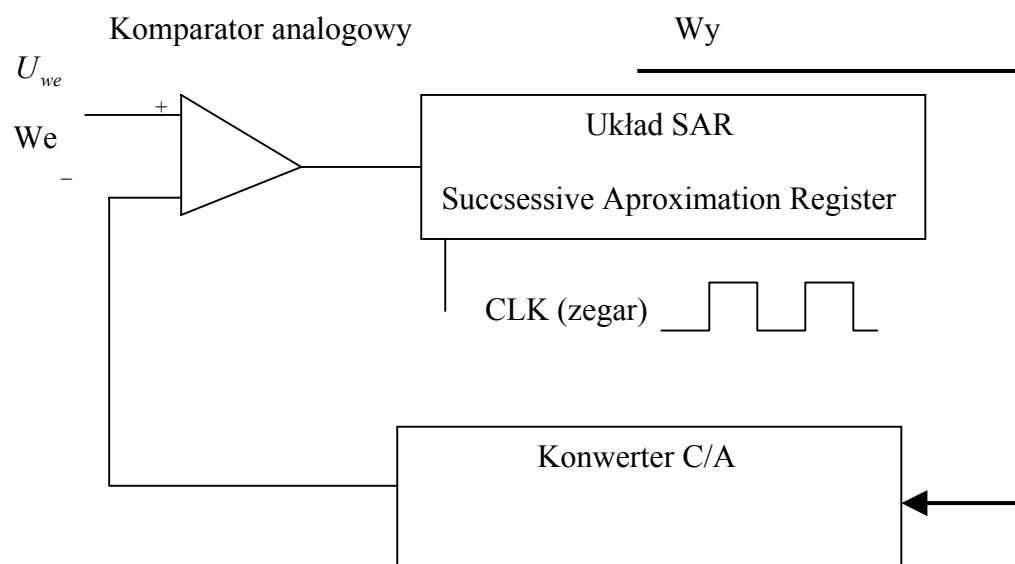


Rys. 6. Układ konwertera typu flash

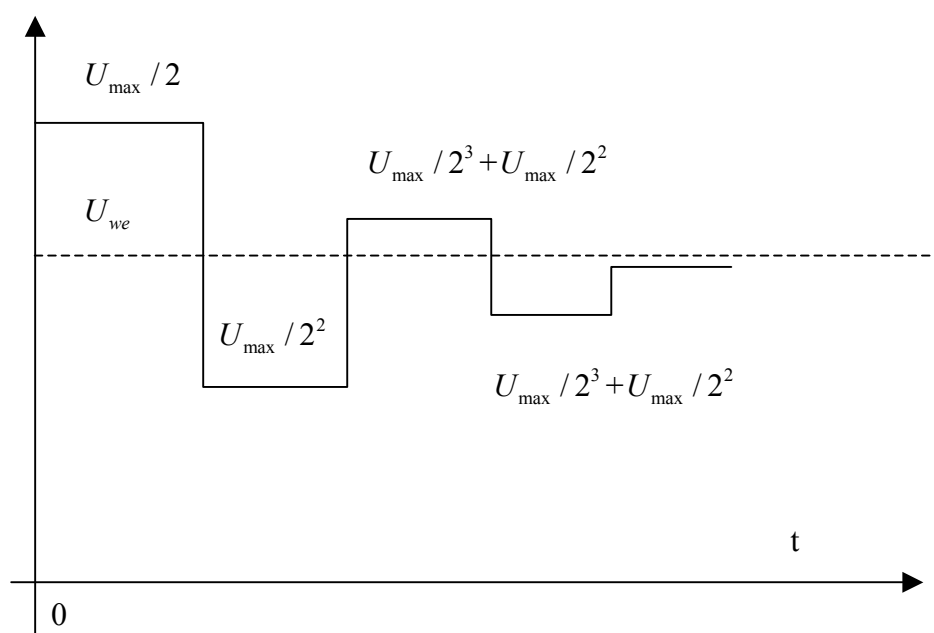
Bardzo popularnym i często stosowanym konwerterem jest tzw. *konwerter A/C z sukcesywną aproksymacją* nazywany również *konwerterem z porównaniem sukcesywnym*. Schemat układu pokazany jest na rys. 7a). Układ przeprowadza konwersję napięcia  $U_{we}$  w  $n$  krokach (w  $n$  taktach zegara), gdzie  $n$  jest liczbą bitów konwertera. Najpierw w rejestrze SAR ustawiane jest  $n$ -bitowe słowo 1000...0 czyli  $a_{n-1} = 1$  i  $a_k = 0$  dla  $k = 0, 1, \dots, n-2$ , a następnie wynik konwersji C/A tego słowa porównywany jest z napięciem wejściowym  $U_{we}$ . Jeśli słowo binarne jest za małe (tzn. konwersja na wartość analogową daje napięcie mniejsze od  $U_{we}$ ), to pozostawiamy 1 na pozycji  $a_{n-1}$  na stałe (tzn. przyjmujemy  $a_{n-1} = 1$ ), w przeciwnym razie ustawiamy na stałe  $a_{n-1} = 0$ . Podobnie postępujemy z kolejnym bitem  $a_{n-2}$ . Podstawiamy  $a_{n-2} = 1$  i sprawdzamy wynik konwersji słowa

11000...0 ustawiając zależnie od wyniku porównania bit  $a_{n-2}$ . Przebieg napięcia na wyjściu konwertera C/A wchodzącego w skład konwertera A/C z sukcesywną aproksymacją pokazany jest na rys. 7b). Po  $n$  taktach zegara wszystkie bity słowa  $a_{n-1}a_{n-2}...a_0$  są już prawidłowo ustawione.

a)



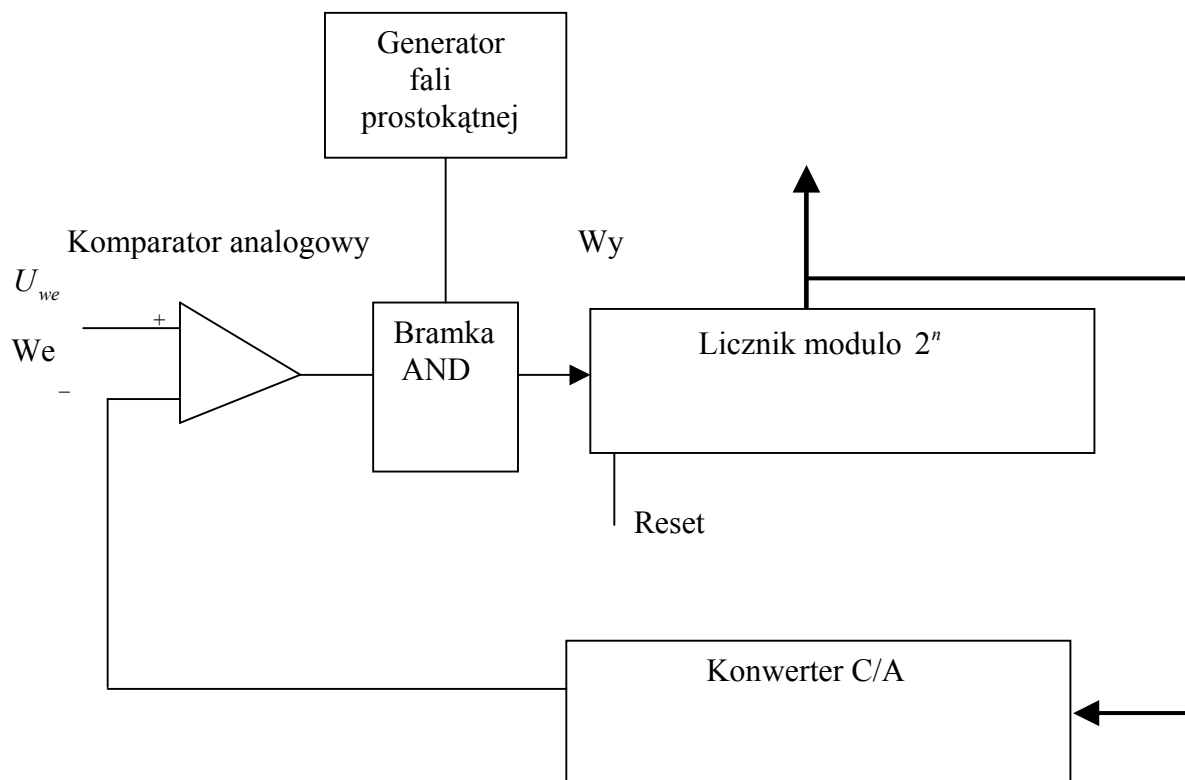
b)



Rys. 7. a) Konwerter A/C z sukcesywną aproksymacją; b) Przebieg napięcia na wyjściu konwertera C/A

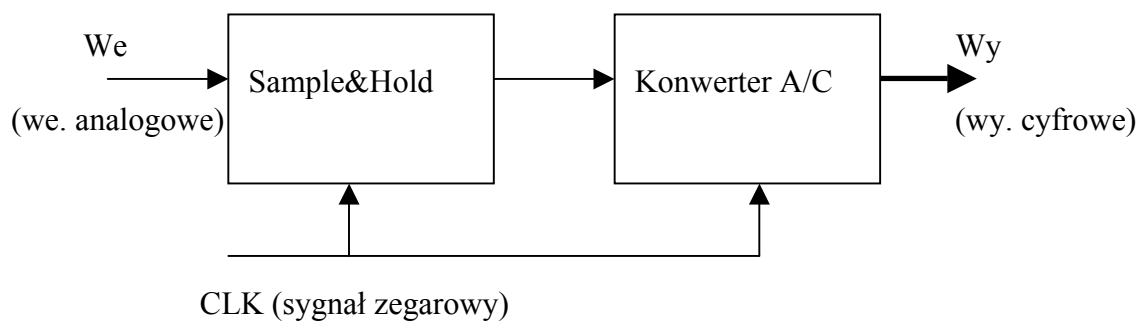
Warto jeszcze wspomnieć o tzw. konwerterach  $\Delta - \Sigma$ . Są to układy osiągające dokładności przekraczające 20 bitów, doskonale nadające się do scalenia.

Istnieje dużo rozmaitego typu układów konwerterów. Zainteresowanych tym tematem odsyłamy do literatury [5]. Niektóre mikroprocesory jednoukładowe (mikrokontrolery) i mikroprocesory sygnałowe wyposażone są we własne przetworniki A/C (i niekiedy C/A umieszczone wewnątrz układu scalonego mikroprocesora).



**Rys. 8. Najprostszy układ konwertera A/C z licznikiem modulo  $2^n$**

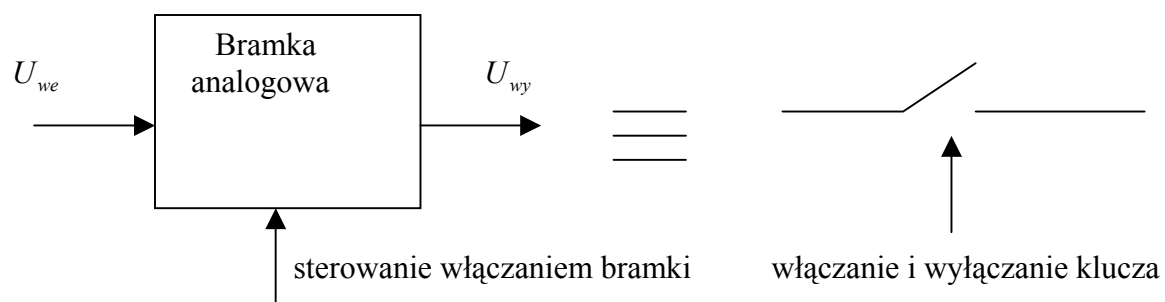
Układ przetwornika A/C na ogół współpracuje z układem próbkująco-pamiętającym (por. rys. 9.)



**Rys. 9. Współpraca układu S/H z konwerterem A/C**

#### 4. Bramki analogowe i multipleksery analogowe

Bramka analogowa to elektroniczna realizacja najprostszego klucza mechanicznego. Klucz elektroniczny ma jednak 2 zalety, których nie ma klucz mechaniczny: jest bardzo mały i jest bardzo szybki. Bramki analogowe wykonuje się na ogół jako układy MOS. O ile rozwarcie bramki w układach tego typu można uznać za idealne, o tyle włączona bramka analogowa ma oporność różniczkową rzędu  $100\ \Omega$ . Jeśli  $2^n$  bramek analogowych wyposażymy w układ dekodera umożliwiający wybór jednej z bramek jako przekazującej sygnał na wyjście, to otrzymamy multiplekser analogowy



**Rys. 10. Bramka analogowa**