

LM331, RC4151

- uniwersalne przetworniki napięcie-częstotliwość i częstotliwość-napięcie

Najśłynniejsze aplikacje

Kostka LM331 to znany i popularny od lat przetwornik napięcie-częstotliwość (V/F – Voltage to Frequency), przeznaczony do wykorzystania w układach konwersji analogowo-cyfrowej, dokładnych przetwornikach napięcie-częstotliwość, integratorach cyfrowych (układach całkujących) o ogromnej stałej czasowej, licznikach energii, generatorach sterowanych napięciem (VCO), układach, gdzie trzeba przesłać informację na dużą odległość, i wielu innych nietypowych zastosowaniach. LM331 to według katalogu przetwornik napięcie-częstotliwość, ale po zmianie konfiguracji układowej kostka staje się przetwornikiem częstotliwość-napięcie (F/V – Frequency to Voltage).

W układzie scalonym znajduje się skompensowane temperaturowo źródło napięcia odniesienia o bardzo dobrej dokładności w całym zakresie temperatur pracy. Precyzyjny układ przerzutnika monostabilnego ma małe prądy polaryzacyjne, a mimo to jest dostatecznie szybki, by zapewnić konwersję V/F sygnałów o częstotliwości 100kHz (niskie prądy polaryzacji są często przyczyną ograniczenia szybkości przełączania i zarazem pasma układu). Układ może być zasilany pojedynczym napięciem w zakresie 5V...40V, a wyjście typu otwarty kolektor jest zabezpieczone przed zwarcieniem do napięcia zasilania. Jeśli układ LM331 wykorzystywany jest jako przetwornik napięcie-częstotliwość, na wyjściu uzyskuje się ciąg impulsów prostokątnych o częstotliwości proporcjonalnej do napięcia wejściowego. **Tabela 1** zawiera podstawowe parametry układu LM331.

Oprócz kostki LM produkowane są wersje LM231 oraz LM131 o szerszym zakresie temperatur pracy. Kilka firm produkuje podobne układy o oznaczeniach zawierających liczbę 4151. Układ RC4151 i odpowiedniki

(XR4151, RC4151, RV4151, RM4151) pełnią identyczne funkcje i mają taki sam układ wyprowadzeń jak LM331. Różnią się tylko niektórymi parametrami: zakres napięć zasilania wynosi 8...22V, liniowość i stabilność napięcia odniesienia są nieco gorsze, a napięcie odniesienia na nóżce 3 wynosi nie 1,89V, tylko 2,05V. Jak widać, różnice są niewielkie, więc układy '4151 w ogromnej większości przypadków mogą być stosowane jako zamienniki kostki LM331. Jedynie gdy wymagana jest wysoka precyzja i liniowość, należy stosować LM331 albo jeszcze lepiej LM231 i LM131.

Parametr	Warunki	Min.	Typ.	Max.
Napięcie zasilania		5		40V
Prąd zasilania	zasilanie 5V	1.5mA	3mA	6mA
	zasilanie 40V	2mA	4mA	8mA
Temperatura otoczenia		0°C		+70°C
Napięcie odniesienia	n. 2	1.7V	1.89V	2.08V
Stabilność napięcia odniesienia	n. 2		±60ppm/K	
Prąd wyjściowy (n.1)	R n.2 (Rs)=14kΩ U n.1= 0V	116μA	136μA	156μA
Zakres prądu n. 1 (n.2)		10μA		500μA
Zakres napięć wejściowych komparatora		-0,2V		Vcc-2V
Napięcie nie zrównoważenia komparatora			±3mV	10mV
Prąd polaryzacji wejść komparatora			-80nA	-0,3μA
Częstotliwość wyjściowa	Uwe=10V (w zalecany układzie pracy)	10kHz		
Wpływ zmian nap. zasilania na wzmacnienie	zasilanie 4.5...10V		0.01%/V	0.1%/V
	zasilanie 10...40V		0.006%/V	0.06%/V

Tabela 1. Parametry układu LM331

Przetwornik napięcie-częstotliwość

Rysunek 1 przedstawia wewnętrzny schemat blokowy i podstawowy układ pracy w roli przetwornika V/F. Przetwarzane (mierzone) napięcie stałe jest podane na nóżkę 7.

Podczas pracy kondensator C2 jest na przemian ładowany i rozładowywany. Rozładowanie przez rezystor R2 następuje stale. Natomiast ładowanie odbywa się okresowo. Kondensator C2 jest ładowany prądem z programowanego źródła prądowego (wypływającym z końcówki 1) tylko przez czas, gdy przerzutnik monostabilny zostanie wyzwolony, a przełącznik K - zwarty. Przerzutnik monostabilny jest wyzwolany przez komparator.

Prąd źródła prądowego jest wyznaczony przez rezystancję włączoną między nóżką 2 a masą ($I_s=1,89V/R_s$). Nóżka 2 może też pełnić rolę źródła napięcia odniesienia, ale dodatkowy prąd z niej pobierany powinien być znikomy, co najwyższej rzędu pojedynczych mikroamperów.

Czas działania przerzutnika monostabilnego jest wyznaczony przez elementy R3 C3, dołączone do nóżki 5 ($T=1,1 \cdot R3 \cdot C3$).

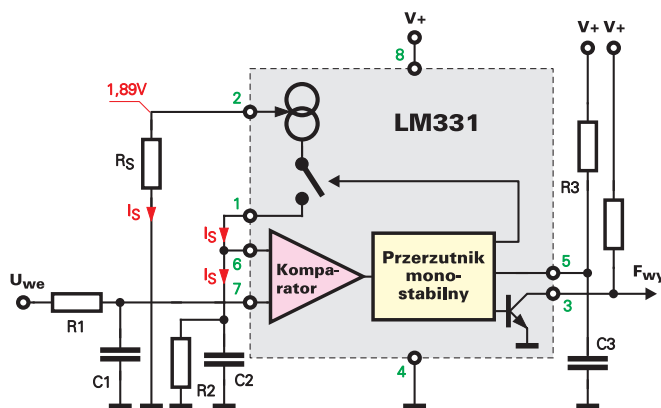
Działanie układu wbrew pozorom wcale nie jest skomplikowane i opiera się na ładowaniu i rozładowaniu kondensatora C2.

W czasie każdego cyklu, w ustalonych warunkach pracy, ładunek dostarczony przez prąd ładujący, wypływający z końcówki 1, musi być równy ładunkowi odpływającemu przez rezystor rozładowujący R2. Znaczy to, że średni prąd rozładowania musi być równy średniemu prądowi ładowania. Nie trzeba

wglębiać się w szczegóły, wystarczy zrozumieć ogólną zasadę pracy.

Po wyzwoleniu przerzutnika monostabilnego kondensator C2 jest ładowany prądem $I_s = 1,89V/R_s$, ale tylko przez czas $T = 1,1 \cdot R_3 \cdot C_3$. Pomimo że część tego prądu odpływa od razu przez rezystor R2, napięcie na kondensatorze C2 rośnie. Po zakończeniu impulsu przerzutnika monostabilnego napięcie na kondensatorze C2 i wejściu komparatora (nóżce 6) zaczyna się zmniejszać. Gdy zmniejszy się ono poniżej napięcia wejściowego, podanego na drugie wejście komparatora (nóżka 7), przerzutnik monostabilny zostanie ponownie wyzwolony na czas wyznaczony przez elementy R3, C3. Jak z tego wynika, zarówno czas, jak i prąd ładowania kondensatora C2 są stałe, natomiast czas rozładowania jest zależny od napięcia wejściowego (na nóżce 7). Czym mniejsze napięcie wejściowe, tym dłużej rozładowuje się kondensator C2, a tym samym mniejsza jest częstotliwość wyjściowa. Nietrudno się domyślić, że częstotliwość powtarzania impulsów jest proporcjonalna do napięcia wejściowego – przeciętnie jest to przetwornik V/F. Częstotliwość wyjściowa jest zależna nie tylko od napięcia U_{we} , ale od kilku innych czynników, co pokazuje poniższy wzór:

$$F_{wy} = (U_{we} \cdot R_s) / (2,09V \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot C_3)$$



Rys. 1 Zasada działania przetwornika V/F

Aby przetwornik był dokładny, elementy R_s , R2, R3, C3 oraz wewnętrzne napięcie odniesienia kostki (napięcie na nóżce 2) powinny być stabilne. Rezystory winny być metalizowane, kondensatory stabilne ceramiczne NP0, styrofleksowe, ewentualnie foliowe poliwęglanowe (MKC) lub poliestrowe (MKT).

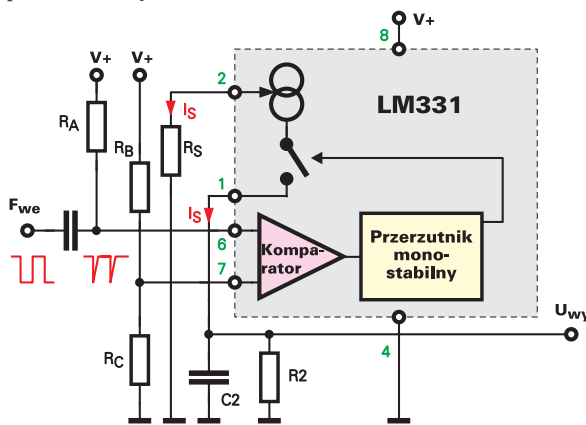
Dla polepszenia parametrów dodano też rezystor wejściowy R1, włączony szeregowo w obwód wejściowy (nóżka 7), co zapewnia kompensację prądów polaryzujących wpływających z wejść 6 i 7 (typowo 80nA).

Kondensator C1 o wartości 10nF...1μF pełni rolę filtra – dobrze jest, gdy jego wartość jest równa pojemności kondensatora C2. Jeśli

stałe czasowe sieci RC podłączonych do wyprowadzeń 6 i 7 są równe, zmiana napięcia wejściowego powoduje natychmiastową zmianę częstotliwości wyjściowej. Jeśli wartość C1 jest znacznie niższa od wartości C2, skokowa zmiana sygnału na wejściu może spowodować chwilowy zanik sygnału wyjściowego.

Przetwornik częstotliwość-napięcie

Jeszcze prostszy jest układ pracy kostki LM331 w roli przetwornika częstotliwość-napięcie (F/V). Typowy schemat aplikacyjny przedstawia rysunek 2.



Rys. 2 Przetwornik F/V

Na nóżkę 7 podawane jest napięcie stałe, większe niż połowa napięcia zasilania. Prostopadły sygnał wejściowy (F_{we}) jest różniczkowany przez układ RA, CA, a powstałe ujemne szpilki są podawane na wyprowadzenie 6 układu i powodują zmianę stanu komparatora wyzwalanie, sterującego przerzutnikiem monostabilnym. Podobnie jak w przypadku przetwornika napięcie-częstotliwość, średni prąd wypływający z wyprowadzenia 1 wynosi:

$$I_s = I_s \cdot (1,1 \cdot R_3 \cdot C_3) \cdot F,$$

gdzie I_s jest prądem wyprowadzenia 2, a F - częstotliwością sygnału wejściowego. Prąd I_s ma wartość:

$$I_s = V_{ref}/R_s,$$

gdzie V_{ref} jest napięciem odniesienia występującym na wyprowadzeniu 2 (typowo 1,89V), a R_s - rezystancją włączoną między masę a wyprowadzenie 2.

Podobnie jak poprzednio, kondensator C2 jest ładowany "porcjami ładunku" i rozładowywany stale przez R2, a średnie napięcie na nim

jest, jak się łatwo domyślić, wprost proporcjonalne do częstotliwości wejściowej F_{we} . Oczywiście napięcie to nie jest idealnie "gładkie" – występują w nim tętnienia. Wartość szczytowa napięcia tętnień nie przekracza jednak 10mV. Niestety, ze względu na konieczność uśredniania napięcia na C2, układ pracujący w roli przetwornika F/V cechuje powolna odpowiedź - stała czasowa wynosi 0,1s, a czas ustalania odpowiedzi (do 0,1% stanu ustalonego) jest równy 0,7s. W przypadku pracy w roli przetwornika V/F takiej zwłoki nie ma – częstotliwość wyjściowa niejako nadąża za zmianami napięcia wejściowego.

Układy praktyczne

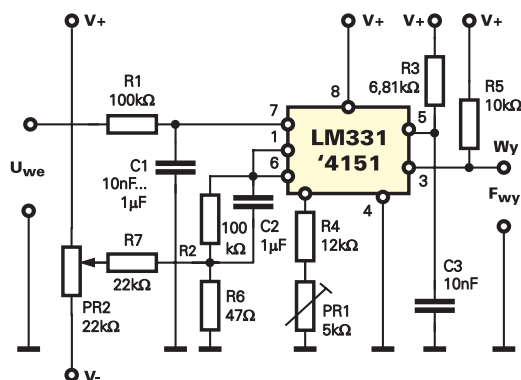
W praktyce podstawowy układ aplikacyjny przetwornika V/F wygląda jak na rysunku 3. Połączony szeregowo z C2 rezystor o niewielkiej wartości (47Ω) powoduje powstanie niewielkiej histerezy i poprawia liniowość układu.

Rezystancja podłączona do wyprowadzenia 2 (R_s), wyznaczająca prąd ładowania, składa się z rezystora stałego 12kΩ i potencjometru 5kΩ. Umożliwia to skompensowanie błędów wzmocnienia układu i tolerancji użytych elementów, by współczynnik

przetwarzania miał potrzebną wartość – zwykle 1,000kHz/V. Za pomocą PR1 należy skalibrować układ dla dużego napięcia wejściowego, na przykład 10V. Zazwyczaj współczynnik przetwarzania będzie wynosił 1kHz/V, a więc przy napięciu wejściowym 10V, za pomocą PR1 należy ustawić częstotliwość wyjściową równą dokładnie 10,00kHz.

Potencjometr PR2 oraz rezystor Rx przewidziane są do ewentualnej korekcji wejściowego napięcia niezrównoważenia komparatora, które może wynosić $\pm 10mV$. Napięcie niezrównoważenia ogranicza od dołu użyteczny zakres napięć mierzonych. Aby uzyskać optymalny zakres napięć pracy, należy za pomocą PR2 skalibrować układ dla małego napięcia

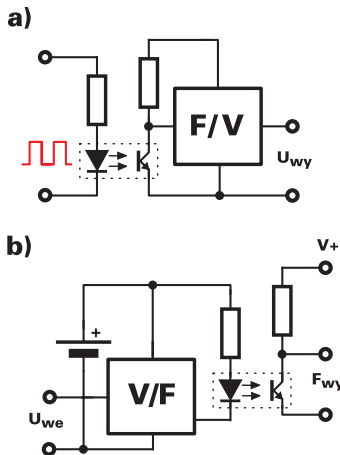
Rys. 3 Praktyczny układ przetwornika V/F



wejściowego, na przykład równego 10mV, uzyskując częstotliwość wyjściową 10Hz (dla współczynnika przetwarzania 1kHz/V). Po takiej dwupunktowej kalibracji w zakresie częstotliwości wyjściowych 1Hz...10kHz (1mV...10V) nieliniowość przetwornika nie powinna być gorsza niż 0,01% pełnej skali.

Warto podkreślić, że do takiej precyzyjnej kalibracji układ zasilany pojedynczym napięciem może wymagać dodatkowego napięcia ujemnego, wykorzystywanego tylko do kalibracji.

Przetwornik LM331 ('4151) w każdym układzie pracy pozwala w bardzo prosty sposób zrealizować izolację galwaniczną za pomocą jednego transoptora. Przykłady pokazane są na **rysunku 4**. Sygnał cyfrowy może też być transmitowany przez radio, światłowod, itp. Kilka przykładów zawartych jest w kartach katalogowych układów LM331 i XR4151.



Rys. 4 Przykłady wykorzystania

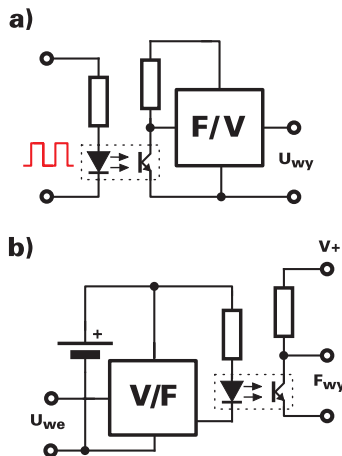
Dla dociekliwych i zaawansowanych

Podane trzy schematy doskonale nadają się do większości zastosowań i mają bardzo dobre parametry. Jeśli jednak ktoś chciałby zbudować przetworniki o jeszcze lepszych właściwościach, zwłaszcza liniowości, może wykorzystać układy aplikacyjne pokazane na rysunkach 5 i 6.

Rysunek 5 przedstawia schemat precyzyjnego przetwornika V/F. Poprawę parametrów uzyskuje się dzięki zastosowaniu dodatkowego wzmacniacza operacyjnego, o małym napięciu niezrównoważenia i małych prądach polaryzujących. Napięcia niezrównoważenia wewnętrznego komparatora nie są już istotne. Dodatkowa poprawa liniowości wynika z faktu, że nóżka 1 (wyjście kluczowanego źródła prądowego) stale pozostaje na tym samym potencjale (masa wirtualna).

Pewną wadą jest konieczność zasilania napięciem symetrycznym. Ponadto sygnały wejściowe muszą być ujemne w stosunku do masy.

Zasada działania pozostaje taka sama jak wcześniej – prąd wejściowy I_{we} musi być taki sam jak *średni* prąd wypływający z końcówki 1. Ważną rolę pełni też kondensator w gałęzi sprzężenia wzmacniacza operacyjnego. Wewnętrzny komparator przetwornika wyzwala przerzutnik monostabilny, gdy napięcie na nóżce 7 przekracza napięcie panujące na nóżce 6.



Rys. 5 Ulepszony układ przetwornika V/F

Rysunek 6 przedstawia schemat precyzyjnego przetwornika F/V o liniowości nie gorszej niż $\pm 0,01\%$, wyposażonego w wyjściowy filtr uśredniający drugiego rzędu.

Z kolei **rysunek 7** pokazuje ultraprecyzyjny przetwornik V/F. Dzięki starannemu doborowi elementów zewnętrznych oraz dodatkowych obwodów korekcyjnych udaje się uzyskać błąd mniejszy niż 0,02% i nieliniowość lepszą niż 0,003% w zakresie temperatur 0...+40°C. Dokładność pozwalającą osiągnąć następujące czynniki:

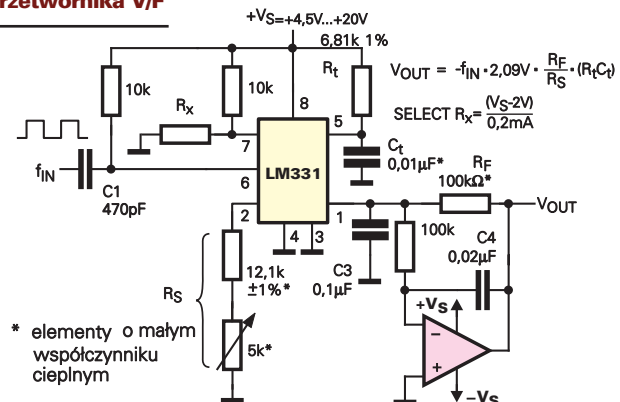
Napięcie niezrównoważenia wzmacniacza operacyjnego jest kompensowane z wykorzystaniem dobrze stabilizowanego napięcia odniesienia z nóżki 2. Rozbudowany obwód ochronny zapobiega pojawieniu się jakiegokolwiek napięcia ujemnego na końcówce 7. Rezystor R4 podaje część napięcia wejściowego na obwód rezystancyjny R_s , co poprawia nieliniowość z 0,004% do 0,002%. Rezystory R2, R3 mają tę samą wartość i pochodzą z tej samej partii

precyzyjnych rezystorów ($\pm 25\text{ppm/K}$), co zapewnia niemal idealną współbieżność zmian cieplnych i redukuje błąd związany ze zmianami temperatury. Napięcie zależne od temperatury z diod CR1...CR3 podane jest przez dobierany indywidualnie rezystor R_x i kompensuje zmiany cieplne wszystkich pozostałych elementów, przy czym CT musi być kondensatorem z dielektrykiem teflonowym lub polistyrenowym wysokiej jakości.

Wiele innych interesujących informacji o możliwościach i sposobach wykorzystania kostek LM331 i odpowiedników '4151 można znaleźć w kartach katalogowych oraz notach aplikacyjnych. Można je znaleźć na stronach internetowych firm National Semiconductor i Exar (www.national.com) oraz www.exar.com). Można je także ściągnąć ze strony internetowej EdW (www.edw.com.pl).

W szczególności wskazówki na temat dobierania wartości elementów do nietypowych zastosowań można znaleźć w karcie katalogowej XR4151 (firmy Exar) na stronie 9.

Piotr Górecki



Rys. 6 Ulepszony układ przetwornika V/F

Rys. 7 Ultraprecyzyjny przetwornik V/F

