

Dział „Projekty Czytelników” zawiera opisy projektów nadesłanych do redakcji EP przez Czytelników. Redakcja nie bierze odpowiedzialności za nieprawidłowe działanie opisywanych układów, gdyż nie testujemy ich laboratoryjnie, chociaż sprawdzamy poprawność konstrukcji.

Prosimy o nadsyłanie własnych projektów z modelami (do zwrotu). Do artykułu należy dołączyć podpisane **oświadczenie, że artykuł jest własnym opracowaniem autora i nie był dotychczas nigdzie publikowany**. Honorarium za publikację w tym dziale wynosi 250,- zł (brutto) za 1 stronę w EP. Przesyłanych tekstów nie zwracamy. Redakcja zastrzega sobie prawo do dokonywania skrótów.

Regulator obrotów silnika prądu stałego ze stabilizacją

Różnorodność typów silników elektrycznych sprawia, że konieczne jest projektowanie dla nich dedykowanych regulatorów obrotów. Ich konstrukcje nie są banalne, muszą bowiem uwzględniać wiele zjawisk fizycznych, jakie zachodzą w silnikach podczas pracy. Dodatkowym utrudnieniem dla projektantów jest konieczność stosowania specjalnych rozwiązań charakterystycznych dla obwodów wysokoprądowych.

Rekomendacje:

regulator zainteresuje majsterkowiczów, modelarzy, elektroników i mechaników, którzy zmuszeni są wiercić otwory w materiałach o różnej strukturze.



Projekt
158

Silnik elektryczny jest maszyną przetwarzającą energię elektryczną w energię mechaniczną (pracę). Odbywa się to za pośrednictwem pola magnetycznego. Zasadniczy podział silników elektrycznych wynika z rodzaju prądu jakim są zasilane i obejmuje dwie grupy: silniki prądu przemiennego i silniki prądu stałego. Ze względu na odmienną budowę, sposób podłączenia, a także charakterystyki ruchowe, w grupie silników prądu stałego wyróżnia się silniki: szeregowo, bocznikowe, z magnesami trwałymi, bezszczotkowe, krokowe i inne. Moce tych silników zawierają się w przedziale od ułamków wata (dla silników napędzających tak zwane nanoroboty mające zastosowanie między innymi w operacjach mikrochirurgicznych), aż do kilku megawatów (taką moc mają zestawy napędowe elektrowozów). Silniki prądu stałego są powszechnie stosowane w sprzęcie przenośnym, głównie dlatego, że większość elektrochemicznych czy też fotowoltaicznych źródeł, wytwarza napięcie stałe.

Dość często zachodzi konieczność regulacji obrotów silnika i ich stabilizacji w dużym zakresie zmian zarówno obrotów, jak i obciążenia. Aby tego

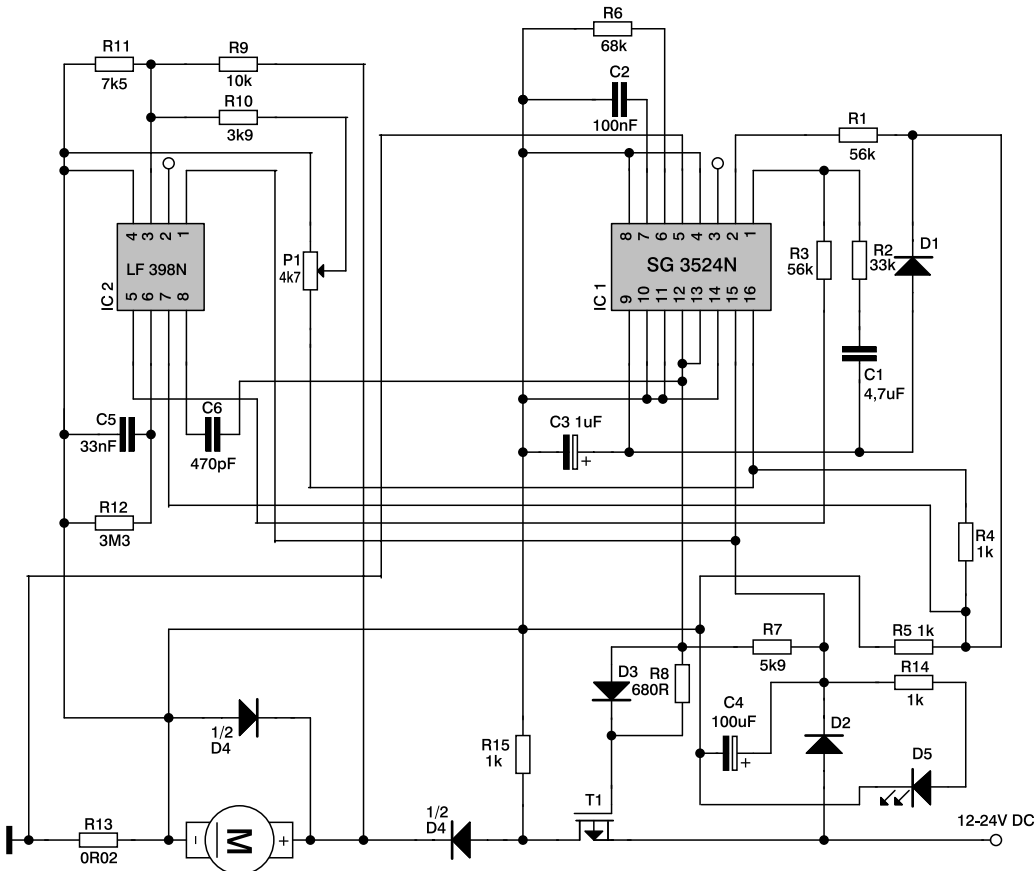
dokonać, wprowadza się do układu regulacji sygnał sprzężenia zwrotnego niosący informację o rzeczywistych obrotach lub prądzie twornika. Do pomiaru prędkości obrotowej służą tachoprądnice oraz impulsatory kontaktowe, hallotronowe lub fotoopływne. Pomiar prądu realizuje się za pomocą przekładników prądowych. Bywa jednak tak, że w urządzeniu napędzanym silnikiem prądu stałego, budowa układu pomiarowego jest mocno utrudniona, a w przypadku silników małej mocy, nieopłacalna. W takim wypadku należy zastosować regulator działający na odmiennym zasadzie niż wspomniane wcześniej. W artykule opisujemy regulator, który nie wymaga podania bezpośredniego sygnału prędkościowego sprzężenia zwrotnego. Jego schemat ideowy został przedstawiony na rys. 1.

Zasada działania

Zgodnie z prawem Faradaya, w przewodzie będącym w obszarze działania zmiennego strumienia magnetycznego wytwarzana jest siła elektromotoryczna indukcji o wartości $E = -\Delta\Phi/\Delta t$, przy czym prąd indukcyjny płynie w takim kierunku, że skut-

PODSTAWOWE PARAMETRY

- Zasilanie: 12...24 V
- Napięcie znamionowe silników: 12...24 VDC
- Moc znamionowa silników: max. 100 W
- Regulacja obrotów potencjometrem lub napięciem 0...5 V



Rys. 1. Schemat ideowy regulatora

ki prądu indukcyjnego przeciwdziałają przyczynom jego powstawania. W będącym w ruchu tworniku silnika, w którym strumień wzbudzenia jest wytwarzany przez magnesy trwałe, w chwili odłączenia zasilania wystąpi siła elektromotoryczna indukcji, której wartość w funkcji czasu jest zależna od prądu twornika. Im obciążenie, a więc i prąd, jest większe, tym napięcie to zaniknie szybciej. Informacja o obciążeniu silnika jest pobierana poprzez pomiar i zapamiętanie wartości siły elektromotorycznej indukcji po pewnym, stałym czasie od chwili wyłączenia napięcia zasilania. Sygnał ten jest następnie wprowadzany do układu regulacji i wpływa na wartość współczynnika wypełnienia napięcia zasilającego silnik, powodując kompensację prądu twornika mającą na celu utrzymanie stałej prędkości obrotowej.

Napięcie nastawy obrotów z suwaka potencjometru P1 jest podawane przez opornik R10 i sumowane na oporniku R11 z napięciem zasilającym silnik, podawanym przez opornik R9. Wypadkowe napięcie regulacji podawane jest następnie na wejście monolitycznego układu próbkującego z pamięcią, LF398N. Na rys. 2

przedstawiono schemat blokowy tego układu. Wejściowy wzmacniacz separujący oraz układ sterujący są wykonane przy użyciu tranzystorów bipolarnych. Wyjściowy wzmacniacz separujący, pracujący w połączeniu wtórnika napięciowego, zawiera stopień wejściowy ze złączowymi tranzystorami polowymi, z kanałem typu p. Wyjście tego wzmacniacza jest połączone poprzez opornik o wartości 30 kΩ z wejściem odwracającym wejściowego wzmacniacza operacyjnego, tworząc wewnętrznie zamkniętą pętlę ujemnego sprzężenia zwrotnego. Układ LF398N charakteryzuje się następującymi parametrami:

- czas przyjęcia próbki nie dłuższy niż 10 μs,
- wzmocnienie równe jeden z dokładnością typowo 0,002%,

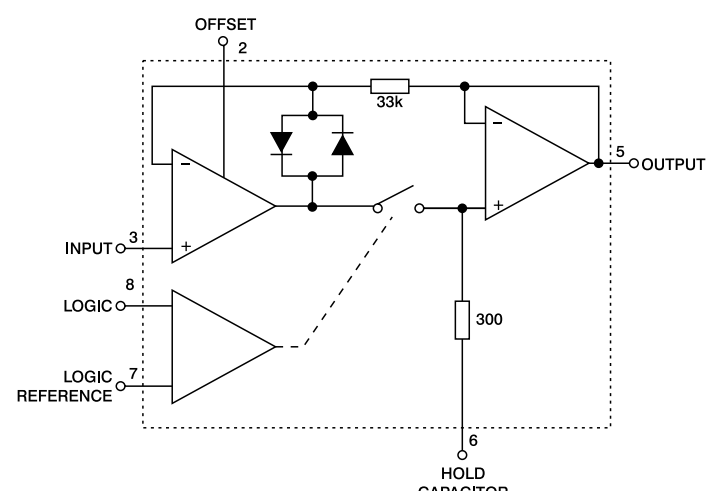
- oporność wejściowa około 10 GΩ.

Napięcie wejściowe jest pamiętane w kondensatorze pamięciowym C5. Kondensator ten powinien charakteryzować się niskim współczynnikiem pozostałości dielektrycznej. W układach próbkujących z pamięcią zaleca się stosowanie kondensatorów z dielektrykiem mylarowym, jednak w tym układzie nie jest to aż tak krytyczne. Można użyć kondensatorów polistyrenowych, poliestrowych, polipropylenowych lub poliwęglanowych. Opornik rozładujący R12 powoduje, że dominującym prądem upływu jest prąd płynący przez niego. Powoduje to zmniejszenie względnego błędu pamiętania. Oczywiście kondensator pamiętający rozładowuje się przez ten opornik, jednak przy dość dużych wartościach R12 i C5 i jednocześnie przy krótkim czasie pamiętania wynoszącym około

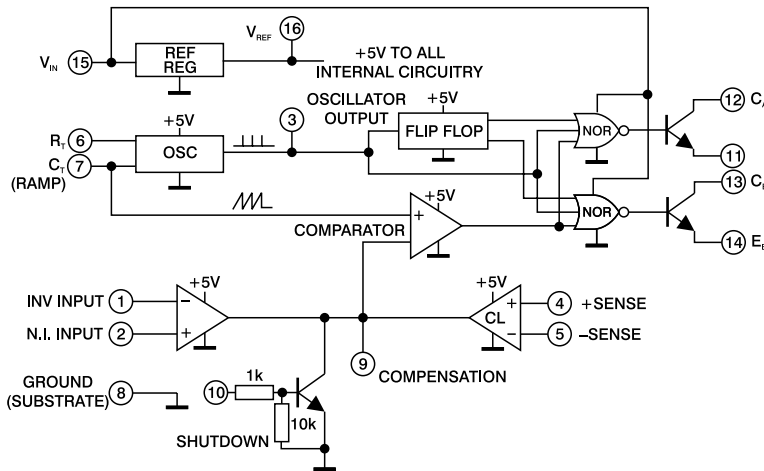
5 ms, nie ma to żadnego wpływu na poprawną pracę układu.

Napięcie wyjściowe z układu LF398N jest podawane przez opornik R3 na wejście odwracające wzmacniacza błędów układu SG3524N.

Układ SG3524N (IC1) jest specjalizowanym, monolitycznym układem scalonym, zawierającym w swojej strukturze wysoko stabilne źródło napięcia odniesienia o wartości 5 V - z tego źródła zasilane są również wszystkie wewnętrzne bloki funkcjo-



Rys. 2. Schemat blokowy układu LF 398N



Rys.3. Schemat blokowy układu SG 3524N

nalne układu. W jego skład wchodzi też: generator napięcia piłokształtnego, wzmacniacz błędów o wartości wzmocnienia w otwartej pętli, typowo 80 dB, układ ograniczania prądu obciążenia, układ blokady natychmiastowej, komparator napięcia oraz przerzutnik sterujący poprzez bramki, tranzystory wyjściowe o obciążalności prądowej do 100 mA. Układ ten może pracować zarówno w trybie z jednym zaciskiem obciążenia dołączonym do wyjścia (drugi jest dołączony do bieguna zasilania), jak i w trybie przeciwsobnym.

Na wejście nieodwracające wzmacniacza błędów podawane jest napięcie odniesienia o wartości 2,5 V uzyskane w dzielniku R4, R5. Napięcie wyjściowe wzmacniacza błędów jest porównywane w komparatorze z napięciem piłokształtnym z generatora – od tego zależy współczynnik wypełnienia impulsów sterujących tranzystorem T1. Kondensator całkujący C1 wpływa na tłumienie zakłóceń o charakterze zmiennym. Od jego wartości zależy również odpowiedź układu na pobudzenie jednostkowe. Powinien to być kondensator suchy, nie polaryzowany. Dioda startowa D1, ogranicza również wartość współczynnika wypełnienia do około 75%, co jest konieczne do prawidłowej pracy silnika zasilanego impulsowo. Powoduje to oczywiście zmniejszenie maksymalnego momentu obrotowego, dlatego silniki o napięciu znamionowym 12 V należy zasilac napięciem w zakresie 15...18 V (uwzględniając spadki napięcia na elementach obwodu głównego), a przy zasilaniu ze źródła o napięciu stałym 12 V – na przykład z akumulatora kwasowo-olowiowego, można stosować silniki 9-woltowe. Średnie napięcie zasilania nie zostanie przekroczone, a niewielki wzrost amplitudy tego napięcia nie

powinien spowodować żadnych negatywnych skutków.

Generator napięcia piłokształtnego dostarcza napięcia niezbędnego do porównania z napięciem wzmacniacza błędów i określenia współczynnika wypełnienia przebiegu wyjściowego. Częstotliwość przebiegu jest określona wzorem: $f=1,18/(R6 \cdot C2)$, f [kHz], R [kΩ], C [μF]. Wynosi ona 200 Hz, co jest wartością optymalną dla większości popularnych silników z magnesami trwałymi. Tranzystory wyjściowe są połączone równolegle i są sterowane naprzemiennie. Przebieg wyjściowy po zróżniczkowaniu w układzie R7–C6 steruje wejściem trybu pracy układu próbkującego z pamięcią LF398N (IC2). Czas przyjęcia próbki wynosi około 10 μs, czas pamiętania około 5 ms. Napięcie odniesienia podawane na ten układ wynosi 2,5 V. Przebieg wyjściowy steruje również bramką tranzystora kluczującego T1. Opornik R8 służy do ograniczania prądu bramki wynikającego z przeładowania pojemności bramki – źródło. Dioda D3 przyspiesza wyłączenie tranzystora zwiększając maksymalną częstotliwość przełączania oraz zmniejszając straty dynamiczne. Zastosowany w układzie tranzystor kluczujący to tranzystor połowy z izolowaną bramką typu IRF5305 (International Rectifier). Charakterystyka się bardzo dobrymi parametrami pracy:

- ciągły prąd źródła: 31 A,
- napięcie przebicia dren-źródło: 55 V,
- rezystancją dren-źródło: 0,06 Ω,
- moc rozpraszana: 110 W,
- czas odzyskiwania zdolności zaworowej: typowo 71 ns.

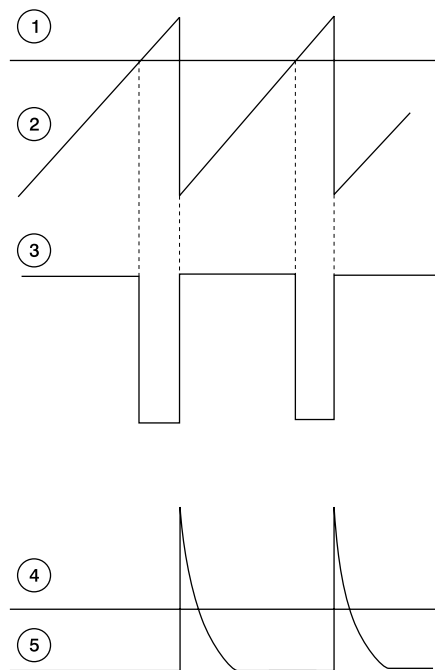
Podwójna dioda D4 zabezpiecza tranzystor T1 przed zakłóceniami po-

chodzącymi od silnika, a wynikającymi głównie z iskrzenia szczotek.

W maszynach komutatorowych najczęściej spotykaną przyczyną iskrzenia szczotek jest niestabilny styk ślizgowy szczotki z komutatorem. Przyczyną niestabilności styku ślizgowego są najczęściej drgania szczotki, bądź też nierówna powierzchnia komutatora. Może to niekiedy doprowadzić nawet do wyładowań łukowych. Dioda zwrotna D4 (druga część) umożliwia przepływ prądu zwrotnego oraz tłumienie przepięcia mogące powstać w silniku przy wyłączaniu napięcia zasilającego. Jest to szybka dioda krzemowa typu BYV42/200, której napięcie przebicia wynosi 200 V, prąd przewodzenia 30 A, a czas odzyskiwania zdolności zaworowej 45 ns. Jej użycie jest konieczne, bowiem gdyby jej nie było, strumień magnetyczny silnika uległby rozproszeniu, co skutkowałoby zwiększeniem temperatury silnika i zmniejszeniem jego mocy. Do ograniczenia maksymalnego prądu płynącego przez silnik, a więc również i zabezpieczenia elementów obwodu głównego służy opornik R13. Napięcie odkładające się na tym oporniku jest podawane do układu ograniczającego prąd znajdującego się w układzie SG3524N i tam jest sumowane z napięciem wyjściowym wzmacniacza błędów wpływając na wypadkową wartość współczynnika wypełnienia napięcia zasilającego silnik. Wartość ograniczenia prądowego jest ustawiona na 10 A. Zastosowanie tego opornika jest bardzo ważne dlatego, że nie tylko zabezpiecza on silnik, tranzystor T1 i diodę D4, ale również dlatego, że oscylogram napięcia na nim odzwierciedla kształt prądu silnika, co niejednokrotnie jest ważne przy serwisie. Układ blokady natychmiastowej SG3524N nie jest wykorzystywany, a wyprowadzenie 10 dołączono do masy. Kondensator C4 wraz z szeregową opornością diody D2, tworzą filtr dolnoprzepustowy eliminujący wpływ zakłóceń przenoszonych się po linii zasilania, na pracę układu. Dioda D2 zabezpiecza również przed odwrotnym podłączeniem zasilania.

Montaż i uruchomienie.

Podstawową czynnością podczas uruchamiania jest sprawdzenie czy działa generator układu SG3524N (potrzebny będzie oscyloskop). Na wyprowadzeniu 7 tego układu powinien wystąpić przebieg piłokształtny o częstotliwości 200 Hz. Prze-



Rys. 4. Przebiegi w charakterystycznych punktach układu: 1 – napięcie na wyjściu wzmacniacza błędu (wyprowadzenie 9 układu SG3524N), 2 – napięcie na wyjściu generatora przebiegu piłokształtnego (wyprowadzenie 7 układu SG3524N), 3 – napięcie sterujące bramką tranzystora T1 (wyprowadzenia 12 i 13 układu SG3524N), 4 – napięcie odniesienia 2,5 V (wyprowadzenie 7 układu LF398N), 5 – napięcie sterujące próbkowaniem i pamiętaniem (wyprowadzenie 8 układu LF398N)

biegi w charakterystycznych punktach układu, charakteryzujące jego zasadę działania przedstawione są na rys. 4.

Tam gdzie płynie prąd, zawsze występują straty. Przy impulsowym zasilaniu występują straty mocy w silniku związane z indukowaniem się prądów wirowych w rdzeniu twornika. Aby je zminimalizować, do budowy rdzenia używa się blach transformatorowych izolowanych lakierem. Straty występują również na elementach obwodu głównego, a więc na tranzystorze T1 i diodzie D4. Dla maksymalnego prądu równego 10 A, moc strat w tranzystorze T1 wyniesie około 6 W. Podobna moc wydzieli się w diodzie D4. Aby odprowadzić wydzielające się wskutek tego ciepło, należy zastosować radiator. Można przyjąć, że dla prawidłowego styku pomiędzy obudową TO220 a radiatorem aluminiowym czernionym, z zastosowaniem podkładek alundowych i smaru si-

likonowego, rezystancja termiczna pomiędzy złączem a radiatorem nie powinna być większa niż 2°C/W. Zakładając wartość rezystancji termicznej pomiędzy radiatorem a otoczeniem również na poziomie 2°C/W, korzystając z krzywych izorezystancyjnych, wyznacza się odpowiednią długość radiatora. I tak, dla odprowadzenia mocy cieplnej 12 W, przy zastosowaniu profilu P5, wystarczy długość 10 cm. Przy temperaturze otoczenia 20°C, temperatura radiatora nie powinna przekroczyć 44°C, a temperatura złącz 68°C. Należy pamiętać, aby radiator był ustawiony żebrami pionowo, gdyż wtedy następuje konwekcyjny przepływ powietrza. Zwiększenie skuteczności chłodzenia można uzyskać stosując wentylator.

Podsumowanie

Opisany powyżej regulator został wykonany w celu użycia do zasilania wiertarki modelarskiej. Zaistniała potrzeba wiercenia w różnych materiałach – inne są obroty potrzebne do wiercenia w drewnie, metalu czy tworzywach sztucznych. Oczywiście nie ogranicza to zakresu jego zastosowań. Może być również użyty do zasilania silników napędzających układy automatyki przemysłowej, niewielkie pojazdy elektryczne, koła garncarskie, miodarki, narzędzia itp. Nadaje się do silników o napięciu znamionowym z zakresu 12...24 V i mocy do 100 W. Zastosowana regulacja potencjometrem nie jest obligatoryjna. Można regulować obroty napięciem, pochodzącym na przykład z przetwornika cyfrowo-analogowego lub z układu zdalnego sterowania. Napięcie to, o wartości od 0...5 V należy podać w miejsce połączenia suwaka potencjometru P1 z opornikiem R10 (oczywiście potencjometru w tym przypadku nie używa się). Podczas projektowania przyjęto założenie, aby było to urządzenie łatwe do wykonania również dla niezbyt zaawansowanych elektroników. Z tego względu wszystkie, użyte do wykonania podzespoły są dostępne w internetowych sklepach wysyłkowych. Opornik R13 można kupić gotowy lub wykonać samodzielnie. Potrzebne jest do tego 10 odcinków drutu ze spirali grzejnej o długości 7 cm. Należy je dokładnie oczyścić i skręcić razem, a końcówki połączyć za pomocą zacisków z elektrotechnicznej listwy zaciskowej

WYKAZ ELEMENTÓW

Rezystory

R1, R3: 56 kΩ
R2: 33 kΩ
R4, R5, R14, R15: 1 kΩ
R6: 68 kΩ
R7: 5,9 kΩ
R8: 680 Ω
R9: 10 kΩ
R10: 3,9 kΩ
R11: 7,5 kΩ
R12: 3,3 MΩ
R13: 0,02 Ω
P1: 4,7 kΩ A (potencjometr)

Kondensatory

C1: 4,7 μF/25 V
C2: 100 nF
C3: 1 μF/25 V
C4: 100 μF/25 V
C5: 33 nF

Półprzewodniki

IC1: SG3524N
IC2: LM398N
T1: IRF5305
D1, D3: 1N4448
D2: 1N4001
D4: BYV42/200
D5: dioda LED

Inne

obudowa KM-50,
zaciski laboratoryjne: 4 szt.

(druć oporowy się nie lutuje). Elementy elektroniczne zostały zmontowane na płytce prototypowej, na której w trakcie uruchamiania urządzenia wprowadzono wiele zmian. Projekt płytki nie nadaje się więc do opublikowania. Więcej informacji na temat użytych elementów można uzyskać na stronach internetowych ich producentów (Texas Instruments, Linear Technology, International Rectifier). Wykonane urządzenie jest regulatorem diachronicznym (to znaczy takim, w którym wartość parametru regulacji w chwili obecnej jest zależna od wartości próbki z chwili poprzedniej), z kompensacją prądu twornika. Przez wprowadzenie do niego układu próbkującego z pamięcią (pamięci analogowej) uzyskano dobre parametry regulacji, wysoką odporność na zakłócenia (zwykle występujące w pobliżu maszyn komutatorowych) i wysoką sprawność tak charakterystyczną dla układów impulsowych.

Dariusz Stępień