

Półmostkowy tyrystorowy regulator napięcia

Streszczenie. W artykule przedstawiono układ półmostkowego regulatora napięcia dla kąta zapłonu tyrystora z przedziału 110-150°. Przesunięcie zapłonu tyrystora do kąta o wartości około 110° zrealizowano na transformatorze małej mocy – przesuwającym kąt o 180° oraz obniżającym napięcie sieciowe i przesuwaniu fazy RC w układzie różniczkującym – przesuwającym napięcie o kąt -70°. Regulację kąta zapłonu w zakresie 110-150° zrealizowano poprzez zmianę amplitudy napięcia sterującego, której wartość określa moment zapłonu tyrystora.

Abstract. A circuit with semi-bridge thyristor voltage regulator for thyristor ignition angle in the range 110-150 degrees is presented. A shift of the ignition angle equals about 110 degrees was realized on the low power transformer (which shifts ignition angle of 180 degrees and reduces line voltage) and RC phase shifter in a differentiation circuit, shifting voltage by an angle of -70 degrees. Regulation of ignition angle in the range between 110-150 degrees was accomplished by changing an amplitude of a control voltage, which specifies moment of thyristor's ignition. (Semi-bridge thyristor's voltage regulator).

Słowa kluczowe: regulator tyrystorowy, mostek Graetza, stabilizator napięcia, zakłócenia.

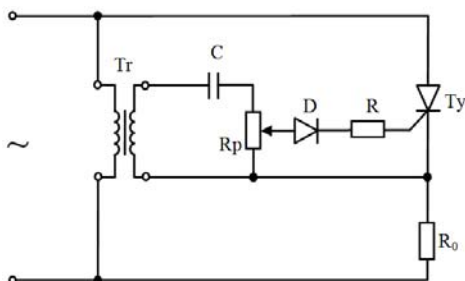
Keywords: thyristor's regulator, Graetz bridge, voltage stabilizer, disturbances.

Wstęp

Zasilacze z transformatorem sieciowym mają znaczne gabaryty i ciężar ze względu na stosowany transformator sieciowy, którego wymiary są wprost proporcjonalne do mocy zasilacza. Współczesne zasilacze urządzeń elektrycznych i elektronicznych często wykorzystują układy falowników, w celu zmniejszenia wymiarów geometrycznych zasilacza [1, 2, 3]. Układy te są źródłem zakłóceń dla sieci energetycznej [4]. Wiele układów elektronicznych potrzebuje zasilaczy bardzo małych mocy, rzędu kilkudziesięciu miliwatów, które nie wymagają zabezpieczenia przed pojawieniem się napięcia fazy z sieci energetycznej na jego elementach. Można wówczas zastosować zasilanie z sieci przez regulator tyrystorowy omówiony w artykule.

Mostek Graetza w regulatorze napięcia stałego

Układy mostków Graetza są często wykorzystywane w układach prostownikowych zasilaczy sieciowych, ze względu na ważną zaletę polegającą na uzyskaniu dwupołkowego prostowania przebiegu sinusoidalnego, bez konieczności zastosowania transformatora lub wykonania wtórnego uzwojenia w transformatorze z odczepem w środku [5, 6]. Podobnie można wykonać dwupołkowy układ regulatora napięcia stałego, którego zasadę działania oparto o układ regulatora tyrystorowego przedstawionego na rysunku 1 [7].

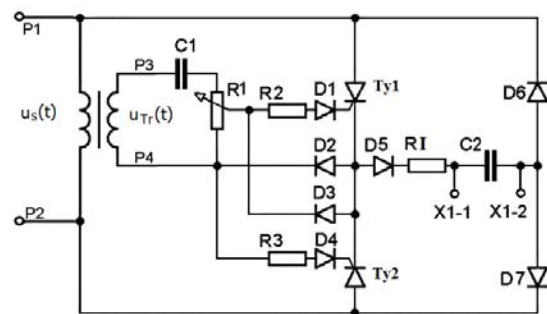


Rys. 1. Układ regulatora tyrystorowego

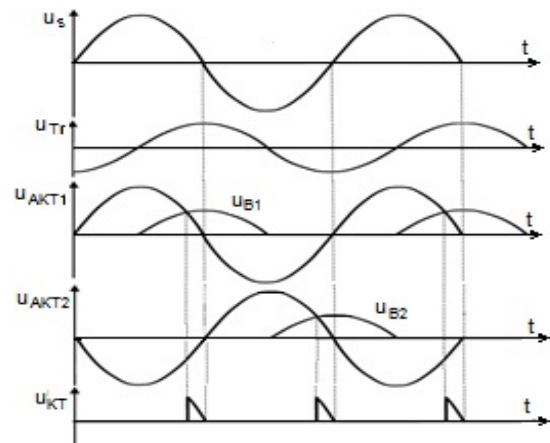
Półmostkowy tyrystorowy regulator napięcia stałego

W wielu zasilaczach urządzeń, w których nie jest ważny problem pojawienia się wysokiego potencjału z przewodu fazowego z sieci 230 V, można stosować układ, którego przykład realizacji przedstawiono na rysunku 2.

Zasadę pracy regulatora tyrystorowego z rysunku 2 przedstawiono na przebiegach czasowych na rysunku 3.



Rys. 2. Tyrystorowy regulator napięcia w układzie Graetza



Rys. 3. Przebiegi napięć na anoda tyrystora – katoda diody (u_{AKT1} , u_{AKT2}), bramka - katoda (u_{B1} , u_{B2}) i wyjściu regulatora u_{KT}

Przyjmujemy, że napięcie w sieci energetycznej u_s jest przebiegiem sinusoidalnym o amplitudzie U_m i pulsacji ω (1).

$$(1) \quad u_s = U_m \sin \omega t$$

Załączenie tyrystora Ty1 następuje dla warunków wynikających z jego technologii wykonania, które producent podaje w danych katalogowych i następuje przy jednoczesnym wystąpieniu dodatniej wartości napięcia na anodzie tyrystora u_{AKT1} ($0 < t < 0,01$ s) i dodatniej wartości prądu bramki (większej od prądu załączenia) w chwili narastania sygnału u_B (rys. 3), czyli w czasie $0,0067 < t < 0,0117$ s. Przesunięcie kąta fazowego napięcia, podanego na bramkę, o wartość 110°

zrealizowano przez zastosowanie transformatora przesuwającego o kąt 180° i układu różniczkującego, który przesuwa napięcie o kąt -70° (2).

$$(2) \quad u_B = U_{Bm} \cdot \sin(314t + 2,09)$$

Moment załączenia tyrystora jest związany z wartością prądu bramki, przekraczającą prąd załączania (parametr charakterystyczny dla każdego tyrystora).

Wyłączenie tyrystorów Ty1 i Ty2 następuje wówczas, gdy prąd tyrystora spadnie poniżej wartości prądu podtrzymania, czyli dla $t \approx n \cdot 0,01$ s, niezależnie od wartości prądu bramki. Dla tyrystora Ty1 ma to miejsce gdy $n = n_n$, gdzie n_n to kolejne liczby nieparzyste. Podobnie wygląda praca tyrystora Ty2 (rys. 3), tylko z opóźnieniem 0,01 s w stosunku do tyrystora Ty1 - gdy $n = n_p$, gdzie n_p to kolejne liczby parzyste. Tyrystor Ty2 załącza się dla drugiej połówki sygnału sinusoidalnego, która dzięki układowi Graetza ma wartość dodatnią na anodzie tyrystora Ty2 i przez podanie na bramkę Ty2 napięcia przesuniętego o 180° w stosunku do napięcia bramki Ty1.

Wyłączenie odbywa się w momencie pojawienia się zerowej wartości napięcia na złączu anoda-katoda dla Ty2. Uzyskany sygnał z mostka u_{KT} podany jest przez diodę D7 na kondensator C2, na którym można uzyskać napięcie o wartości średniej obliczonej ze wzoru (3).

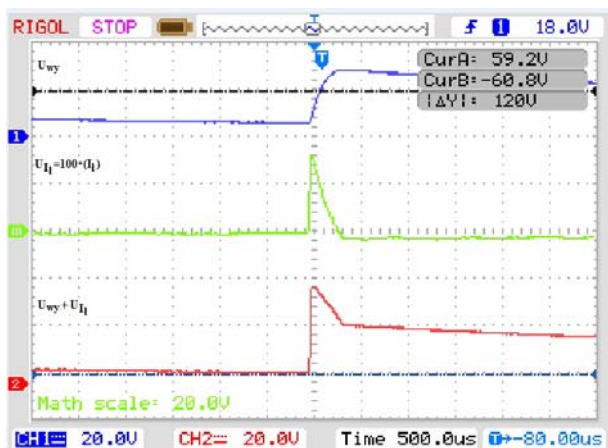
$$(3) \quad U_{sr} = \frac{1}{\pi} \int_0^{0,01} U_m \sin 314t \begin{cases} 0, & \text{dla } 0 < t < t_z \\ 1, & \text{dla } t_z < t < 0,01 \end{cases} dt$$

Rzeczywisty układ uzyskuje zapłon w przedziale czasu $0,0068 < t < 0,0097$ s. Można wówczas uzyskać regulację napięcia w przedziale wartości $80 - 0$ V, obliczonych zgodnie ze wzorem (4).

$$(4) \quad U_{sr} = \frac{1}{\pi} \int_{t_z}^{0,01} U_m \sin 314t dt = \frac{U_m \sin 314t_z}{\pi}$$

Zastosowanie diody D5 umożliwia kolejne, cykliczne włączanie tyrystorów, dla każdej odpowiedniej połówki napięcia sieciowego. Brak diody powoduje pojawienie się na katodach tyrystorów potencjału dodatniego z elektrody kondensatora całkującego C2 (rys. 2). Zmniejszenie napięcia na kondensatorze spowoduje włączenie jednego z tyrystorów i doładowanie kondensatora C2.

Zmianę wartości prądu ładowającego I_l układ RIC2 przedstawia przebieg spadku napięcia U_{II} (rys. 4) na rezystorze $R1 = 100 \Omega$ włączonym szeregowo z kondensatorem C2 (rys. 2).

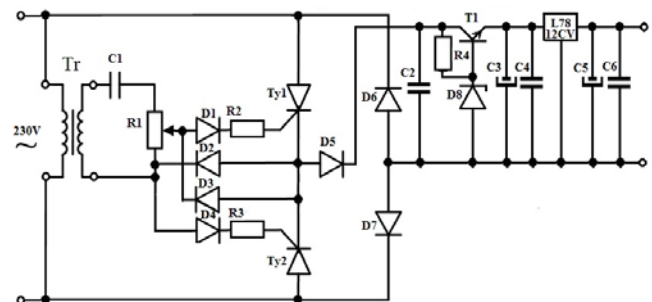


Rys. 4. Przebieg wartości prądu ładowania kondensatora i napięcia na kondensatorze

Wartość prądu ładowania I_l ma charakter impulsu, którego czas trwania (około 0,4 ms) jest związany z szybkością ładowania się kondensatora pod wpływem malejącego w czasie napięcia ładowania. Ze względu na malejącą wartość napięcia ładowania w funkcji czasu, proces ładowania kończy się w momencie, gdy wartość napięcia na kondensatorze zrówna się z napięciem ładowania, widocznym na przebiegu $U_{wy} + U_l$ na rysunku 4.

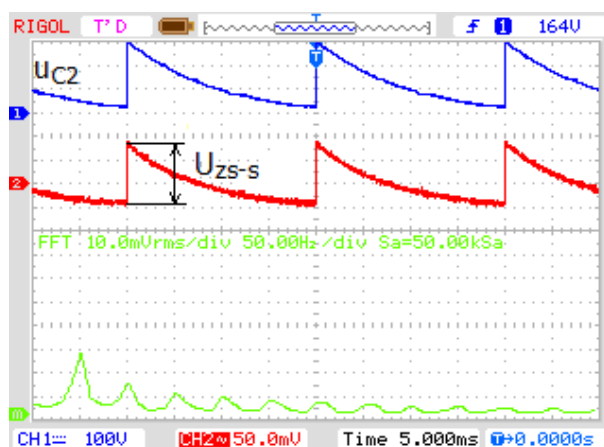
Zasilacz stabilizowany napięcia stałego z regulatorem tyrystorowym

Energię zgromadzoną w kondensatorze C2 można wykorzystać do uzyskania napięcia np. 12 V przez dołączenie stabilizatora napięcia (rys. 5).



Rys. 5. Schemat zasilacza stabilizowanego z regulatorem tyrystorowym

Ze względu na duże zmiany w funkcji czasu napięcia $u_{C2}(t)$, o wartości międzyszczytowej U_{C2s-s} ok. 200 V (rys. 6), na wyjściu regulatora tyrystorowego, konieczne jest wprowadzenie wstępnego stabilizatora napięcia o napięciu wyjściowym rzędu 30 V, odpornego na wysokie wartości napięcia wejściowego. Tak przygotowane źródło napięcia można przekształcać stabilizatorem na wartości napięć poniżej 30 V, np. 12 V. Po wstępnej stabilizacji wykonanej na elementach T1, D8, C3 i C4 do wartości 30 V, sygnał zakłócający maleje do wartości $U_{ss} = 1$ V. Ostatni stopień stabilizacji wykonany na układzie UL7812 pozwala uzyskać napięcie wyjściowe o wartości 12 V z napięciem zakłócającym $U_{ss} = 150$ mV (rys. 6). Układ stabilizatora tłumii zakłócenia do wartości rzędu $U_{ss} = 150$ mV przy obciążeniu $R_o = 5$ k Ω .

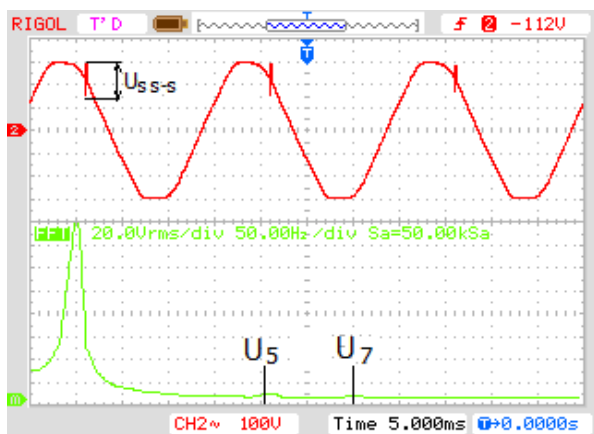


Rys. 6. Przebiegi napięć w zasilaczu po regulatorze tyrystorowym (U_{C2}) i po stabilizatorze UL7812CV wraz z widmem sygnału

Zakłócenia napięcia w urządzeniach z regulatorem tyrystorowym

Zasada pracy tyrystorowego regulatora napięcia, polegająca na szybkim, krótkotrwałym włączeniu ładowania

układu całkującego, wprowadza zakłócenia występujące zarówno w sygnale napięcia regulowanego, jak i w sieci energetycznej zasilającej regulator [8]. Napięcie sieciowe jest zakłócanie w momencie załączenia tyrystora (rys. 7).



Rys. 7. Przebieg napięcia zasilającego układ regulatora tyrystorowego z wykresem częstotliwości harmonicznych

Energia elektryczna służy do jednoczesnego zasilania różnych urządzeń energetycznych i elektronicznych. Konstrukcja tych urządzeń musi zapewniać ich kompatybilność elektromagnetyczną.

Istnieje kilka definicji współczynników opisujących jakość energii elektrycznej [9, 10]. Wydaje się, że dla potrzeb prezentowanego układu i jego zastosowania wystarczy wyznaczyć współczynnik zniekształceń nieliniowych i przeprowadzić analizę widmową.

Technika pomiaru współczynnika zniekształceń nieliniowych z wykorzystaniem oscyloskopu cyfrowego polega na wyznaczeniu wartości podstawowej częstotliwości sygnału za pomocą analizatora FFT, a następnie, wykorzystując filtr cyfrowy środkowozaporowy, dokonanie pomiaru wartości skutecznej sygnału bez składowej podstawowej U_{n-1} i wartości skutecznej całego sygnału U . Na podstawie (5) oblicza się współczynnik zniekształceń nieliniowych h wyrażony w % wartości sygnału, który w artykule [9] oznaczony jest jako TDF (Total Distortion Factor).

$$(5) \quad h = TDF = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n U_i^2}}{U} \cdot 100$$

gdzie:

U_i – wartość skuteczna i -tej harmonicznej

U – wartość skuteczna całego sygnału

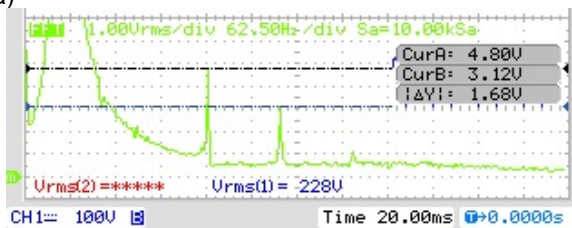
Przeprowadzono pomiary wartości współczynnika zniekształceń nieliniowych napięcia sieciowego (napięcia wejściowego regulatora), napięcia wyjściowego regulatora oraz napięcia wyjściowego stabilizatora napięcia.

Pomiary przeprowadzono dla obciążenia zasilacza rezystancją $R_{o1} = 5 \text{ k}\Omega$ i $R_{o2} = 1 \text{ k}\Omega$. Wyniki pomiarów z analizatora widma częstotliwości przedstawiono na rysunkach 7 i 8.

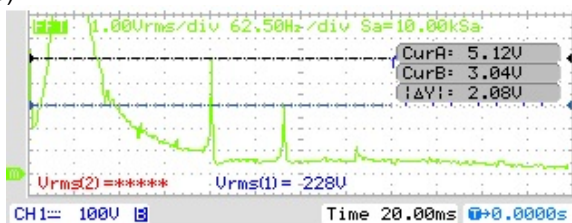
Układ tyrystorowy w niewielkim stopniu wprowadza zniekształcenia nieliniowe w sygnale zasilającym. Współczynnik TDF dla istniejących warunków wzrósł z wartości 2,5 % do wartości 2,6 % po włączeniu regulatora tyrystorowego. Istotnym zakłóceniem jest duża wartość międzyszczytowa impulsu napięciowego $U_{ss-s} = 150 \text{ V}$ (rys. 7) o czasie trwania 0,4 ms powtarzającego się z częstotliwością 50 Hz, co powoduje pojawienie się piątej

harmonicznej o wartości 4,8 V i siódmej harmonicznej o wartości 3,1 V (rys. 8).

a)



b)



Rys. 8. Wykres widma częstotliwości dla sygnału sieciowego:

a) $R_{o1} = 5 \text{ k}\Omega$, b) $R_{o2} = 1 \text{ k}\Omega$

Wnioski

1. Układ Graetza można zastosować w tyrystorowym regulatorze napięcia.
2. Zrealizowany stabilizator napięcia z regulatorem tyrystorowym może zasilać odbiorniki małej mocy, rzędu 0,1 W.
3. Zakłócenia wprowadzane przez regulator tyrystorowy do sieci mają charakter impulsów o czasie trwania 0,4 ms.

LITERATURA

- [1] Mysiak P., Przegląd rozwiązań prostowników energoelektronicznych o zmniejszonym oddziaływaniu na sieć zasilającą. Zastosowania i tendencje rozwojowe, *Przegląd Elektrotechniczny*, 85 (2009), nr 12, 231-241
- [2] Rząsa J., Wdowiarski M., Tyrystorowy regulator napięcia w systemie elektroenergetycznym – badania symulacyjne w programie PSIM, *Przegląd Elektrotechniczny*, 87 (2011), nr 8, 102-107
- [3] Hingorani N., Gyugyi L., Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems, Wiley-IEEE Press; December 1999, str.425-429
- [4] Łatka M., Grad M., Analiza odkształceń napięć i prądów przekształtnika AC/DC zastosowanego w wysokoobrotowych układach napędowych w urządzeniach AGD, *Przegląd Elektrotechniczny*, (2011), nr 8, 82-86
- [5] Barlik R., Nowak N., Technika tyrystorowa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa (1994)
- [6] Piróg S., Baszyński M., Sterowanie wysokoobrotowym silnikiem indukcyjnym małej mocy, *Przegląd Elektrotechniczny*, 87 (2011), nr 2, 151-156
- [7] Rylski A., Układ sterowania tyrystorów w stabilizatorach napięć stałych, Opis patentowy nr 126102, 31-05-1985
- [8] Łatka M., Modyfikacja topologii i sterowania prostowników mostkowych jako metoda ograniczania ich negatywnego oddziaływania na sieć zasilającą, *Przegląd Elektrotechniczny*, 83 (2007), nr 2, 27-31
- [9] Kuśmierk Z., Harmoniczne w systemach elektroenergetycznych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 82 (2006), nr 6, 8-19
- [10] Bianchi N., Bolognani S., Luise F., Potentials and limits of highspeed PM motors, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 40 (2004), n. 6, 1570-1578

Autorzy: dr inż. Andrzej Rylski, dr inż. Jakub Wojturski, Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Zakład Metrologii i Systemów Diagnostycznych, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów, E-mail: rylski@prz.edu.pl; wojtur@prz.edu.pl; Magdalena Nizioł, Patryk Post, studenci Politechniki Rzeszowskiej, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów, E-mail: m.k.niziol@wp.pl; Patryk_Post@wp.pl