

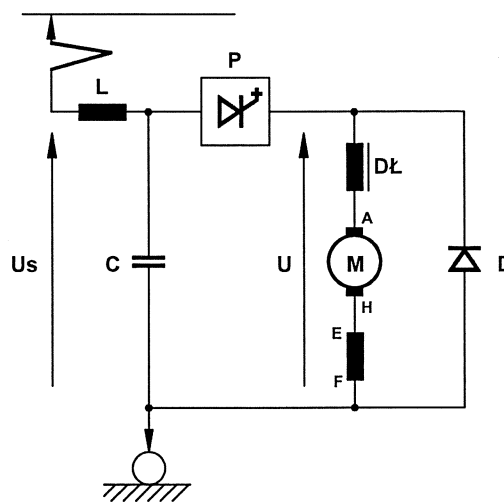
# Regulacja impulsowa napędów trakcyjnych

*Zastosowanie, w obwodach głównych pojazdów trakcyjnych, sterowanych urządzeń półprzewodnikowych dużej mocy, takich jak tyrystory konwencjonalne (ang. SCR), tyrystory wyłączane bramką (ang. GTO), tranzystory mocy z izolowaną bramką (ang. IGBT), zmieniło zasadniczo nie tylko sam obwód elektryczny, ale i parametry techniczne całego pojazdu. W końcu lat 60-tych zbudowano w Niemczech pierwsze prototypy lekkich pojazdów z regulacją impulsową. Były to między innymi lekkie lokomotywy manewrowe zasilane z własnej baterii akumulatorów.*

Na tych prototypach potwierdzono zasady projektowe oraz obliczenia. Na początku regulacja impulsowa była rozważana tylko jako alternatywa techniczna, jednakże późniejsze udoskonalenie tyrystorów, wzrost cen energii, wzrost mocy jednostek napędowych sprawił, że rozwiązanie to stało się opłacalne ze względów ekonomicznych, to znaczy tańsze w całkowitym rozliczeniu od regulacji stycznikowej. Koniec lat 70-tych w Europie to rozwój seryjnej produkcji pojazdów trakcyjnych z regulacją impulsową. W tym czasie każda znacząca fabryka taboru, aby nie ulec konkurencji i wzmocnić swą pozycję na rynku, wprowadzała do produkcji pojazdy nowej generacji. Również w Polsce podjęto to wyzwanie. Wykonano szereg prototypów regulacji impulsowej dla tramwajów i zespołu trakcyjnego EN-57, które były poddane próbom ruchowym. Pierwszymi byli: dawna ELTA w Łodzi (dziś ABB Transportation) oraz Instytut Elektrotechniki w Warszawie. Jednakże krajowe wysiłki nie zaowocowały seryjną produkcją, jak to miało miejsce w Zachodniej Europie. Niesprzyjające warunki gospodarcze: energia była zbyt tania, dominował rynek producenta, utrudnione były zakupy za granicą sprawiły, że regulacja impulsowa nie była opłacalna zarówno dla użytkowników, jak i producentów. Obecnie, w nowych i zmienionych warunkach, coraz częściej postrzega się uzasadnienie ekonomiczne dla tej nowej regulacji.

## Zasada regulacji impulsowej

Regulacja impulsowa to w zasadzie cykliczne naprzemienne podawanie mocy i jej odłączanie od odbioru. Tak więc moc do odbioru na przykład silnika trakcyjnego nie jest podawana w sposób ciągły tak, jak w regulacji stycznikowej, lecz impulsowo. Częstotliwość impulsów podania mocy i przerw może zmieniać się w zakresie od paruset do kilku tysięcy cykli na sekundę (czyli od paruset do kilku tysięcy Hz). Regulacja na przykład prędkości obrotowej czy prądu silnika polega na zmianie, czyli wydłużaniu lub skracaniu czasu trwania impulsu podawania mocy w każdym cyklu pracy. Tak więc, aby zmniejszyć moc podawaną do silników, to znaczy zmniejszyć ich prędkość obrotową lub prąd, nie potrzeba włączać w obwód silnika rezystora, który się grzeje i wytraca moc, lecz wystarczy skrócić czas trwania impulsu podawania mocy. Regulacja w swojej idei eliminuje rozruchowe rezystory mocy, jednakże ze względu na impulsowy charakter przepływu mocy wymagany jest filtr wejściowy oraz dławiki do wygładzania prądu silnika. Na rys. 1 pokazano prosty obwód rozruchu impulsowego.



Rys. 1. Prosty obwód rozruchu impulsowego:

- L, C* - indukcyjność i pojemność filtra wejściowego
- P* - przekształtnik impulsowy
- DŁ* - dławik silnika
- M* - silnik trakcyjny
- D* - dioda obciążenia
- Us* - napięcie sieci trakcyjnej
- U* - napięcie na silniku

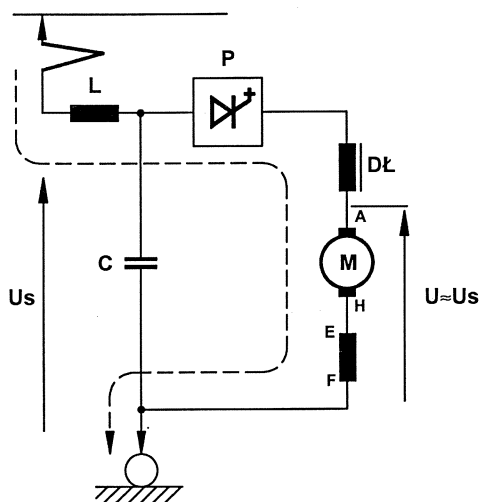
W obwodzie na rys. 1 występują dwa stany: jeden, gdy przekształtnik P jest załączony i prąd z sieci przez filtr LC, przekształtnik P, dławik DŁ dopływa do silnika i drugi, gdy przekształtnik P jest wyłączony i prąd z sieci nie dopływa do silnika – występuje przerwa w zasilaniu silnika.

Dla uproszczenia wyprowadzenia zależności opisujących proces regulacji impulsowej należy przyjąć, że:

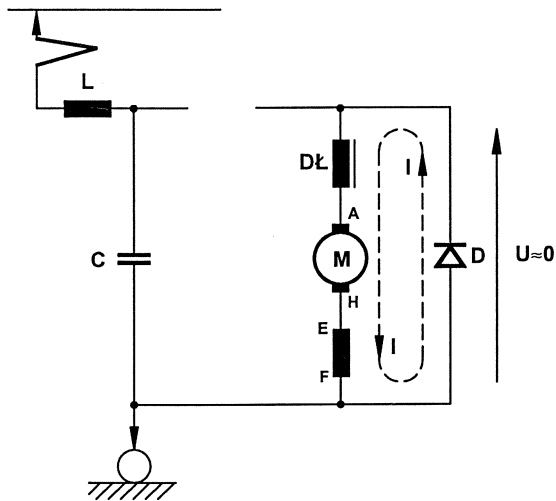
- filtr wyjściowy LC jest bardzo skuteczny;
- przekształtnik P jest zbliżony do idealnego zaworu, to znaczy gdy jest załączony to stanowi połączenie elektryczne, zaś gdy jest wyłączony to stanowi przerwę;

– dławik silnika DŁ jest bardzo skutecznym i całkowicie eliminuje pulsację prądu w silniku.

Przy tych założeniach można pominąć elementy indukcyjne. Na rys. 2, 3 pokazano odpowiednio stan załączenia oraz wyłączenia przekształtnika. W czasie trwania stanu załączenia (rys. 2) napięcie silnika jest równe napięciu sieci. W czasie trwania stanu wyłączenia (rys. 3) napięcie na silniku jest równe praktycznie zero, gdyż przewodzi dioda D.



Rys. 2. Stan załączenia przekształtnika



Rys. 3. Stan wyłączenia przekształtnika

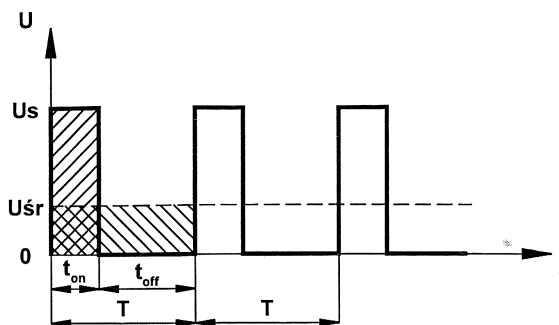
Jeśli oznaczymy:

$t_{on}$  – czas załączenia,  
 $t_{off}$  – czas wyłączenia,  
 $T$  – czas trwania jednego cyklu  $T$ ,  
 to możemy opisać zależność:

$$T = t_{on} + t_{off} \quad (1)$$

Wówczas przebieg napięcia na silniku ma postać jak na rys. 4.

Wartość średnią napięcia na silniku  $U_{sr}$ , która jest praktycznie równa sile elektromotorycznej silnika, powstaje



Rys. 4. Przebieg napięcia na silniku.

z uśrednienia za każdy cykl napięcia prostokątnego z rys. 4, co wyraża poniższa zależność:

$$U_{sr} = \frac{1}{T} (U_s \cdot t_{on} + 0 \cdot t_{off}) = U_s \cdot \frac{t_{on}}{T} \quad (2)$$

Jak z tego widać, wartość średnia  $U_{sr}$  jest jednym bokiem prostokąta, którego drugi bok jest równy  $T$ , zaś pole równe polu prostokąta:

$$U_s \times t_{off} \text{ czyli: } U_{sr} \times T = U_s \times t_{on}$$

Wprowadźmy współczynnik wysterowania  $\alpha$  określony zależnością:

$$\alpha = \frac{t_{on}}{T} \quad (3)$$

Wówczas średnie napięcie na silniku oraz napięcie w sieci trakcyjnej łączy zależność:

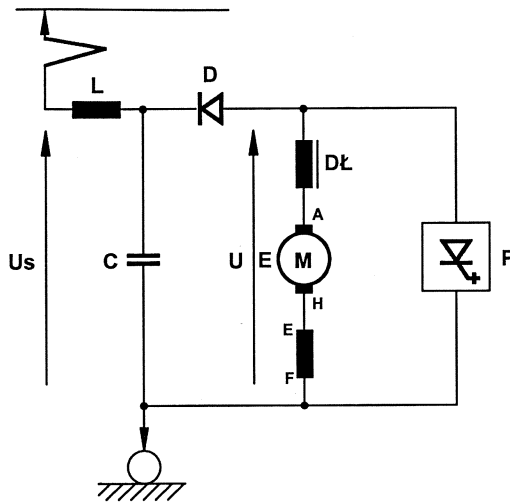
$$U_{sr} = \alpha \cdot U_s \quad (4)$$

Wysterowanie  $\alpha$  może się zmieniać w zakresie od 0 do 1. Dla  $\alpha = 0$  napięcie średnie na silniku wynosi  $U_{sr} = 0$  i silnik pozostaje nieruchomy, natomiast dla  $\alpha = 1$  silnik ma znamionowe warunki zasilania i obraca się z pełną prędkością. Dla pośrednich wartości wysterowania  $\alpha$  można utrzymywać dowolnie długo zadane prędkości obrotowe (prędkości pojazdu trakcyjnego) praktycznie bez strat energii.

### Hamowanie odzyskowe – zwrot energii do sieci

Regulacja impulsowa umożliwia hamowanie silnikami trakcyjnymi ze zwrotem energii do sieci. Zasada działania jest bardzo podobna do opisanej w p. 2 z tym, że silnik staje się źródłem mocy, zaś sieć trakcyjna jest odbiornikiem. Na rys. 5 pokazano prosty obwód hamowania impulsowego.

W obwodzie hamowania (rys. 5) w stosunku do obwodu rozruchu (rys. 1) zamieniono miejscami diodę D i przekształtnik P oraz skojarzenie wirnika i wzbudzenia, a to z powodu zmiany kierunku prądu w silniku. W stanie załączenia przekształtnika P dioda D nie przewodzi, natomiast silnik przechodzi do pracy prądnicowej i zachowuje się jak prądnica szeregowo, której zaciski zostały zwarte. Wówczas następuje samowzbudzenie się maszyny i forsowanie prądu. Szybkość narastania prądu ograniczają: magnetyczne własności maszyny oraz dławik DŁ, w którym gromadzi się energia. W stanie wyłączenia przekształtnika P powstaje siła elektro-



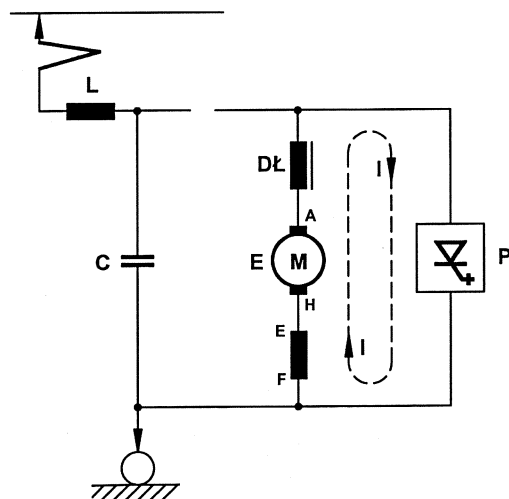
Rys. 5. Prosty obwód hamowania odzyskowego.

motoryczna samoindukcji, na dławiku DŁ i dioda D przewodzi, zaś prąd z silnika przepływa do sieci trakcyjnej. Silnik zachowuje się jak prądnicą szeregową, która zaczyna się odzwubdzać po przyłączeniu jej zacisków do źródła napięcia o wartości większej niż jej SEM. Dioda D zapobiega zmianie kierunku prądu i zasilania silnika z sieci trakcyjnej. Dla wyprowadzenia zależności na hamowanie odzyskowe należy przyjąć, że:

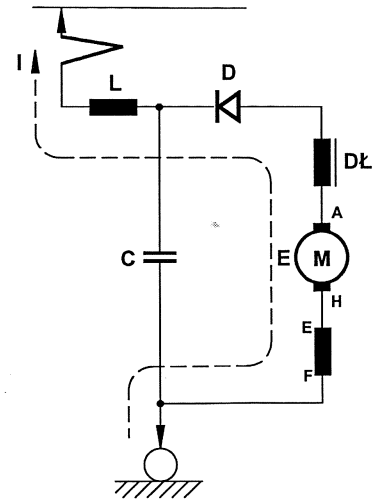
- filtr wejściowy LC jest bardzo skuteczny (jak dla rozruchu);
- przekształtnik P jest zbliżony do idealnego (jak dla rozruchu);
- dławik silnika DŁ, przeciwnie jak dla rozruchu, nie eliminuje całkowicie pulsacji prądu w silniku.

W czasie trwania stanu załączenia  $t_{on}$  (rys. 6) napięcie na gałęzi silnika i dławika wynosi  $U = 0$ , zaś SEM silnika wynosi  $E$ , które praktycznie nie zmienia się (czas załączenia  $t_{on}$  jest bardzo krótki, a zmiany  $E$  są powolne). Podczas stanu wyłączenia  $t_{off}$  (rys. 7) napięcie na gałęzi silnika i dławika wynosi:

$$U = U_s, \text{ zaś SEM równa się } E.$$

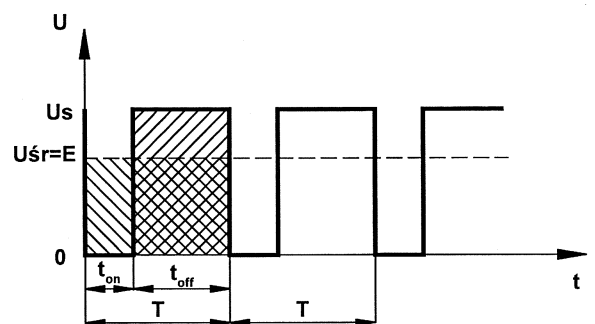


Rys. 6. Stan załączenia przekształtnika P



Rys. 7. Stan wyłączenia przekształtnika P.

Przebieg napięcia na gałęzi silnika dławika pokazano na rys. 8



Rys. 8. Przebieg napięcia na gałęzi silnika.

W poszczególnych stanach słuszne są poniższe zależności: stan załączenia:

$$U = E + L \cdot \frac{dl}{dt} = 0 \quad (5)$$

gdzie:

$L$  - suma indukcyjności DŁ i silnika

stan wyłączenia:

$$U = E + L \cdot \frac{dl}{dt} = U_s \quad (6)$$

Wartości średnie napięcia na gałęzi silnika określa następująca zależność:

$$U_{sr} = \frac{1}{T} \int_0^T U dt \quad (7)$$

Zależność tę można uprościć i zapisać podobnie jak dla rozruchu:

$$U_{sr} = \frac{1}{T} (0 \cdot t_{on} + U_s \cdot t_{off}) = U_s \cdot \frac{t_{off}}{T} \quad (8)$$

wstawiając  $t_{off} = T - t_{on}$  otrzymamy:

$$U_{sr} = U_s \left( \frac{T - t_{on}}{T} \right) = U_s \left( 1 - \frac{t_{on}}{T} \right) + U_s (1 - \alpha) \quad (9)$$

W pełnym cyklu impulsowania energia zgromadzona w indukcyjności na początku w fazie wzbudzenia zostanie odprowadzona na końcu, w fazie odwzbudzenia tak, że średnie za cykl napięcie na indukcyjności jest równe zero. Stąd średnie napięcie na gałęzi  $U_{sr} = E$ . Wówczas średnie napięcie na silniku i napięcie w sieci trakcyjnej łączy zależność:

$$E = U_s (1 - \alpha) \quad (10)$$

Poprzez zmianę wysterowania  $\alpha$  w zakresie  $0 \div 1$  można uzyskać hamowanie elektryczne z odzyskiem przy różnych prędkościach pojazdu trakcyjnego. Dla  $\alpha = 1$  otrzymujemy teoretycznie

$$E = U_s (1 - 1) = 0,$$

co odpowiada prędkości bliskiej zero. W trakcie hamowania odzyskowego prąd płynie przez pantograf do sieci i może być on postrzegany przez sieć trakcyjną jako ruchoma dodatkowa podstacja.

W artykule podano jedynie ideę regulacji impulsowej. Techniczne rozwiązania są bardziej skomplikowane. Projektant tych obwodów i urządzeń musi przeprowadzić bardziej złożoną analizę zjawisk elektrycznych niż dla klasycznego rozruchu oporowo-stycznikowego. Dzisiaj, po ponad 30 latach doświadczeń, ta nowa wiedza staje się normalnym standardem technicznym produkujące firmy opracowały nowszą generację pojazdów z napędem silnikami asynchronicznymi.

□ R-26/96

## ABB Transportation Sp. z o.o.

Zakład Aparatury Trakcyjnej  
i Dźwignicowej

### produkuje

#### urządzenia energoelektroniczne dla trakcji kolejowej i tramwajowej

- przetwornice statyczne główne i pomocnicze prądu stałego i przemiennego na znamionowe napięcia zasilania od 110 V do 3000 V na napięcia wyjściowe zgodne z życzeniem zamawiającego
- regulatory napięcia
- przekaźniki elektroniczne

#### aparaturę trakcyjną mechanizmową prądu stałego na napięcia od 24 V do 3000 V i prąd od 5 A do 2000 A dla

- pojazdów kolejowych
- tramwajów i trolejbusów
- pojazdów transportu wewnętrznego (wózki akumulatorowe)
- lokomotyw kopalnianych dołowych, sieciowych i akumulatorowych

#### aparaturę dźwignicową na napięcia do 500 V prądu przemiennego dla

- dźwigów i suwnic
- żurawi budowlanych
- żurawi przemysłowych i portowych

ABB Transportation Sp. z o. o.  
Zakład Aparatury Trakcyjnej  
i Dźwignicowej w Łodzi  
ul. Aleksandrowska 67/93  
91-224 Łódź  
tel. +48 42 526041  
fax +48 42 521856



**ADtranz**