

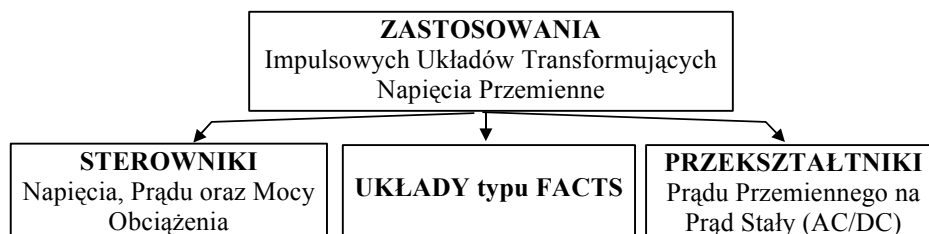
Rozdział 5

Przykłady zastosowań

5.1. Wprowadzenie

Jak już wspomniano w podrozdziale 1.2, propozycje zastosowań impulsowych układów transformujących napięcia przemiennie obejmują trzy obszary. Są one zestawione i opisane na rys. 5.1. Obejmują one również propozycje zastosowań przedstawione w pracach własnych autora [17], [20] oraz pracach zespołowych z udziałem autora [26], [27], [32] – [36], [38] – [41], [51], [68], [71], [81], [119], [122], [126], [128], [133], [147].

W opisie przykładów zastosowań omawianych układów, które przedstawiono w tym rozdziale, wykorzystano również modele obwodowe uśrednione SM oraz SMR opracowane w ramach pracy.



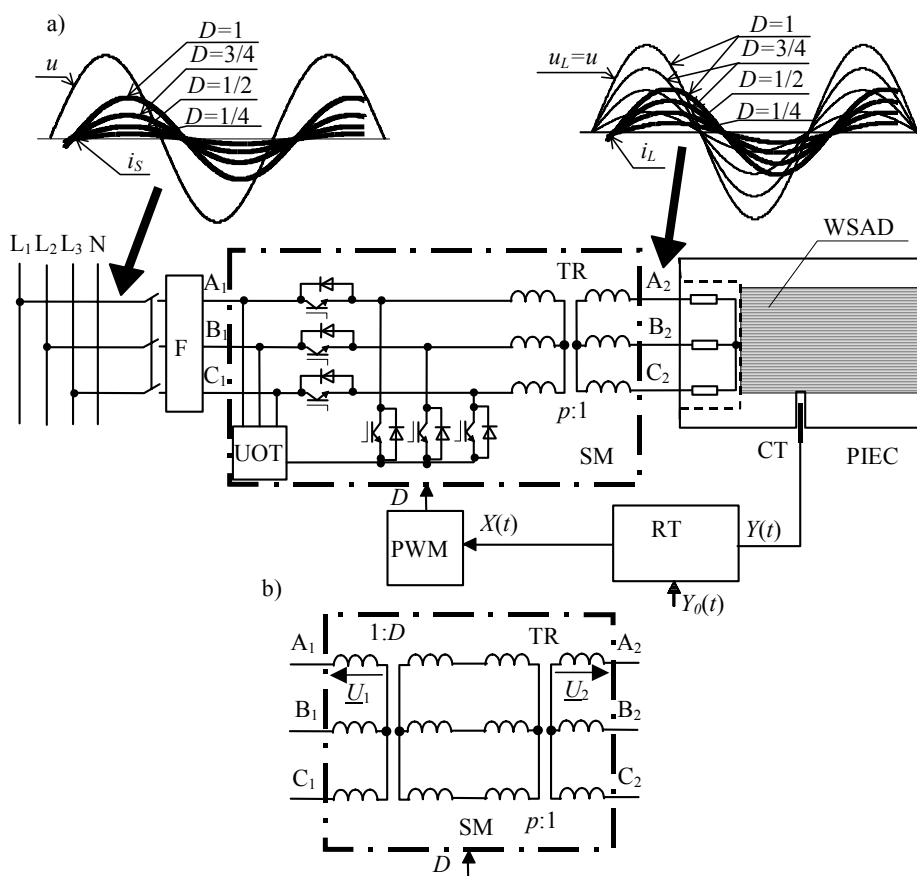
Rys. 5.1. Zastosowania impulsowych układów transformujących napięcia przemiennie

5.2. Sterowniki prądu przemiennego

Przykład zastosowania omawianych układów, w którym SM jednobiegunowy o sterowaniu typu PWM jest stosowany jako sterownik mocy prądu przemiennego w układzie automatycznej regulacji temperatury, pokazano na rys. 5.2. W tym układzie (rys. 5.2) przez SM przepływa energia elektryczna dostarczana ze źródła do obciążenia. W celu zilustrowania funkcji SM jako układu trans-

formującego napięcie przemiennie zależnie od współczynnika wypełnienia impulsu D , na rys. 5.2b jest pokazany model obwodowy uśredniony SM. Transformowanie napięcia w tym układzie opisuje zależność (tabl. 4.1):

$$\underline{U}_2 = \frac{D}{p} \underline{U}_1, \quad (5.1)$$



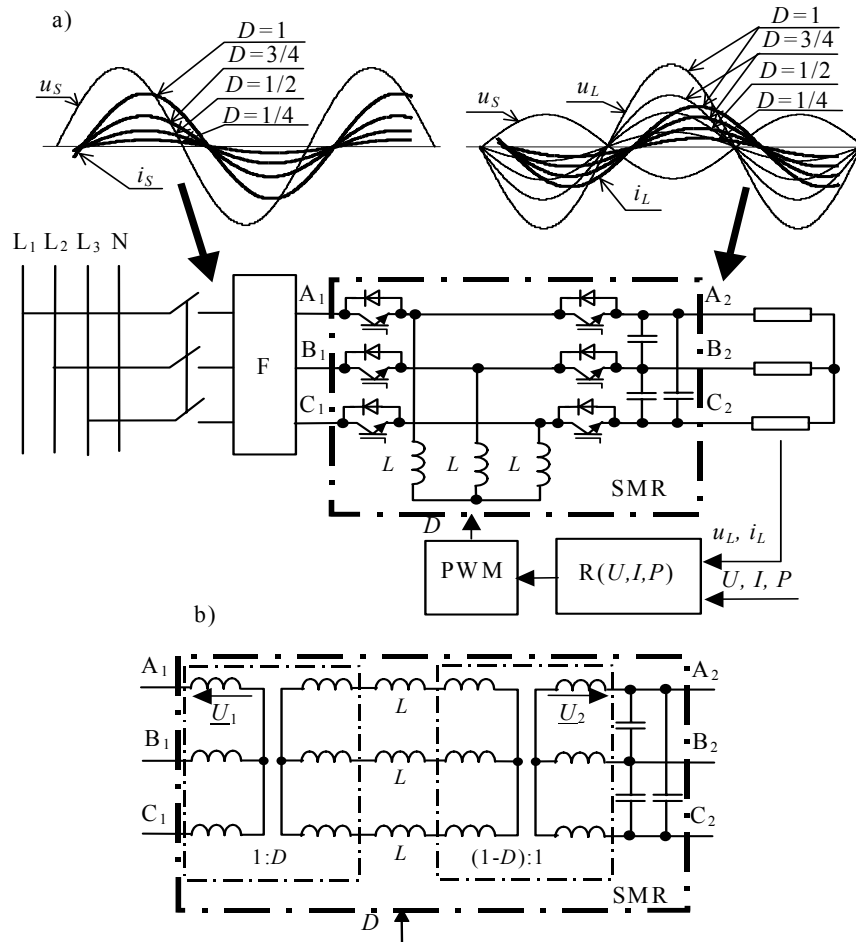
Rys. 5.2. Układ automatycznej regulacji temperatury z SM jednobiegunowym izolowanym według [157] z modyfikacją UOT według [120],

a) schemat blokowy, b) model obwodowy uśredniony SM

F – filtr wejściowy, UOT – układ obejściowo-tłumiący, RT – regulator temperatury

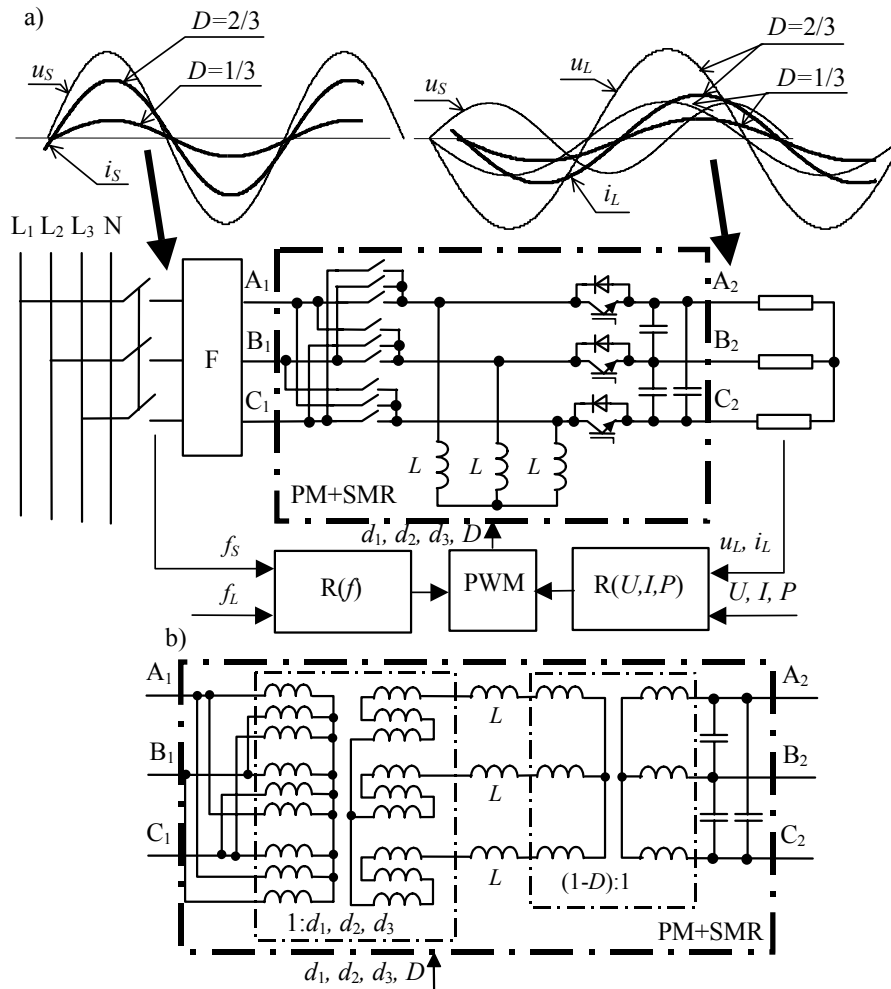
Na rys. 5.3 pokazano inną realizację sterownika, w której jest stosowany SMR jednobiegunowy o topologii typu buck-boost. Ten SMR umożliwia uzyskanie napięcia wyjściowego o wartości większej od wartości napięcia zasilającego (5.2), (tabl. 4.3).

$$\underline{U}_2 = \frac{D}{1-D} \underline{U}_1. \quad (5.2)$$



Rys. 5.3. Układ sterownika prądu przemiennego z SMR jednobiegunowym o topologii typu buck-boost [36], [40], [161], a) schemat blokowy, b) model obwodowy uśredniony SMR; F – filtr wejściowy, $R(U, I, P)$ – odpowiednio regulator napięcia, prądu, mocy

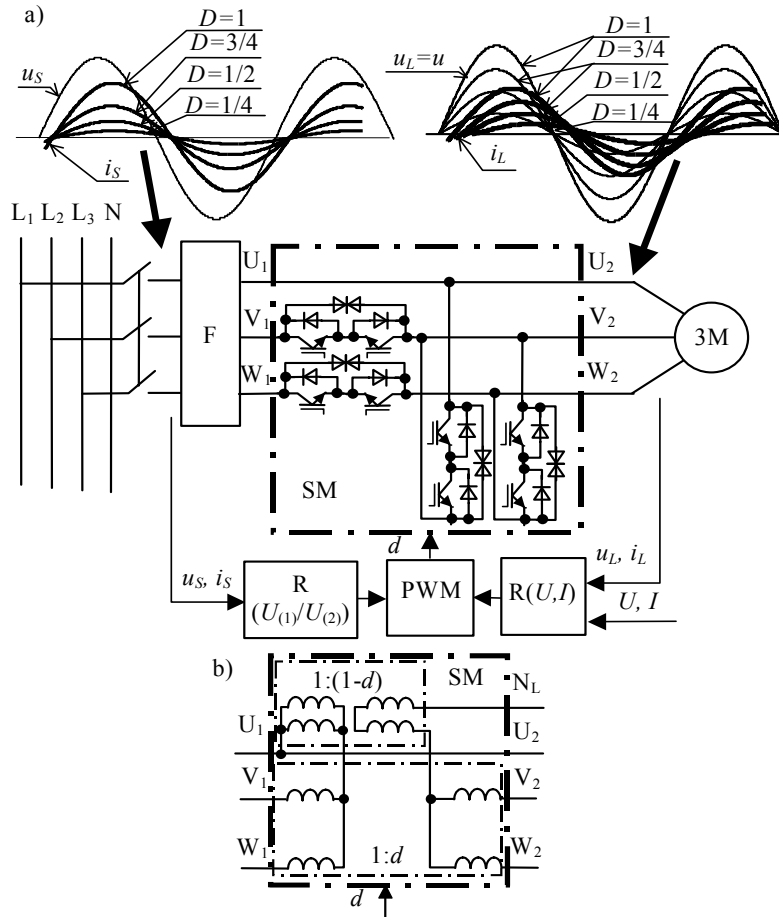
Jak wspomniano wcześniej (podrozdział 1.2), zastosowania omawianych układów obejmują również wykorzystanie SMR do transformowania napięcia wyjściowego przemiennika częstotliwości z bezpośrednim przekształtnikiem matrycowym (PM). Uproszczony schemat takiej realizacji przemiennika częstotliwości pokazano na rys.5.4. W tym układzie jest stosowany SMR o topologii typu buck-boost, co umożliwia uzyskanie napięcia wyjściowego o wartości większej od wartości napięcia zasilania (5.2).



Rys. 5.4. Układ przemiennika częstotliwości z SMR o topologii typu buck-boost [161], a) schemat blokowy, b) model obwodowy uśredniony przekształtnika matrycowego (PM) oraz SMR (model PM według [7])

F – filtr wejściowy, $R(U, I, P)$ – odpowiednio regulator napięcia, prądu, mocy f_L – częstotliwość harmonicznej podstawowej napięcia wyjściowego PM

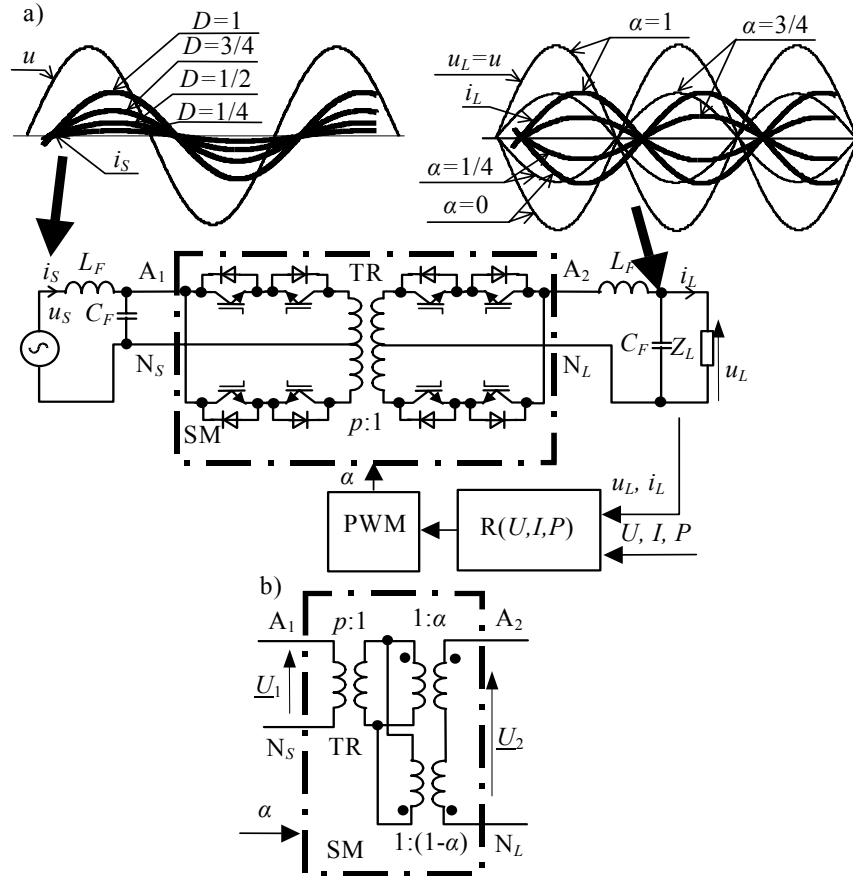
Na rys. 5.5 pokazano układ “miękkiego startu” (z ang. *soft starter*) silnika indukcyjnego z SM niesymetrycznym wykorzystywanym jako układ transformujący wejściowe napięcie przemiennie proporcjonalnie do współczynnika wypełnienia impulsu D . W tym układzie są proponowane rozwiązania układu sterowania SM umożliwiające dodatkowo symetryzację napięcia obciążenia [156] oraz poprawę wejściowego współczynnika mocy przez zastosowanie sterowania typu APWM [65], [66], [159].



Rys. 5.5. Układ “miękkiego startu” silnika indukcyjnego z SM jednobiegunowym niesymetrycznym [27], [156], a) schemat blokowy, b) model obwodowy uśredniony SM

W omawianym obszarze zastosowań znajduje się również rozwiązanie sterownika prądu przemiennego z SM dwubiegunowym o sterowaniu typu PWM z przesunięciem fazowym nazwanym w pracy [60] “transformerem inteligentnym” (z ang. *intelligent transformer*). Układ z takim rozwiązaniem sterownika jest pokazany na rys. 5.6. Charakterystyczną cechą tego rozwiązania jest korzystne wysokoczęstotliwościowe transformowanie energii elektrycznej przez transformator TR. Zależność opisująca transformowanie napięcia w tym układzie jest następująca (3.17):

$$\underline{U}_2 = (2\alpha - 1) \frac{U_1}{p}, \quad (5.3)$$



Rys. 5.6. Układ sterownika prądu przemiennego z SM dwubiegunowym o sterowaniu typu PWM z przesunięciem fazowym [60]. a) schemat blokowy, b) model obwodowy uśredniony SM

5.3. Układy typu FACTS

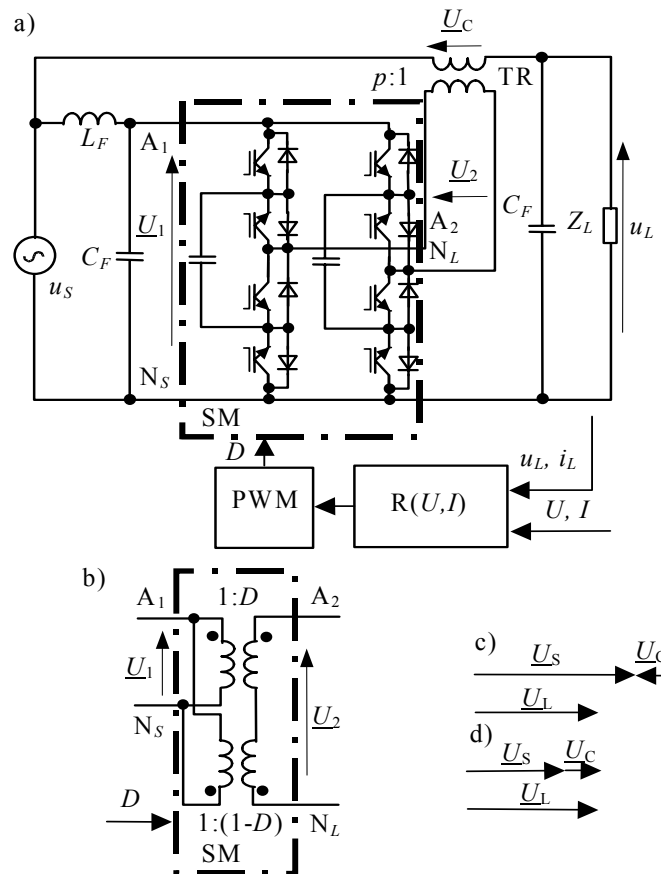
5.3.1. Stabilizatory napięcia przemiennego

Typowy przykład zastosowania SM dwubiegunowego o sterowaniu typu PWM w jednofazowym układzie stabilizatora napięcia przemiennego pokazano na rys. 5.7. SM jest wykorzystywany jako układ transformujący napięcie przemiennie i spełnia funkcję regulowanego źródła napięcia przemiennego, które jest połączone szeregowo ze źródłem zasilania za pomocą transformatora TR. Wartość napięcia wyjściowego SM i jego polaryzacja (faza) jest zależna od wartości współczynnika wypełnienia impulsu D (tabl. 4.1):

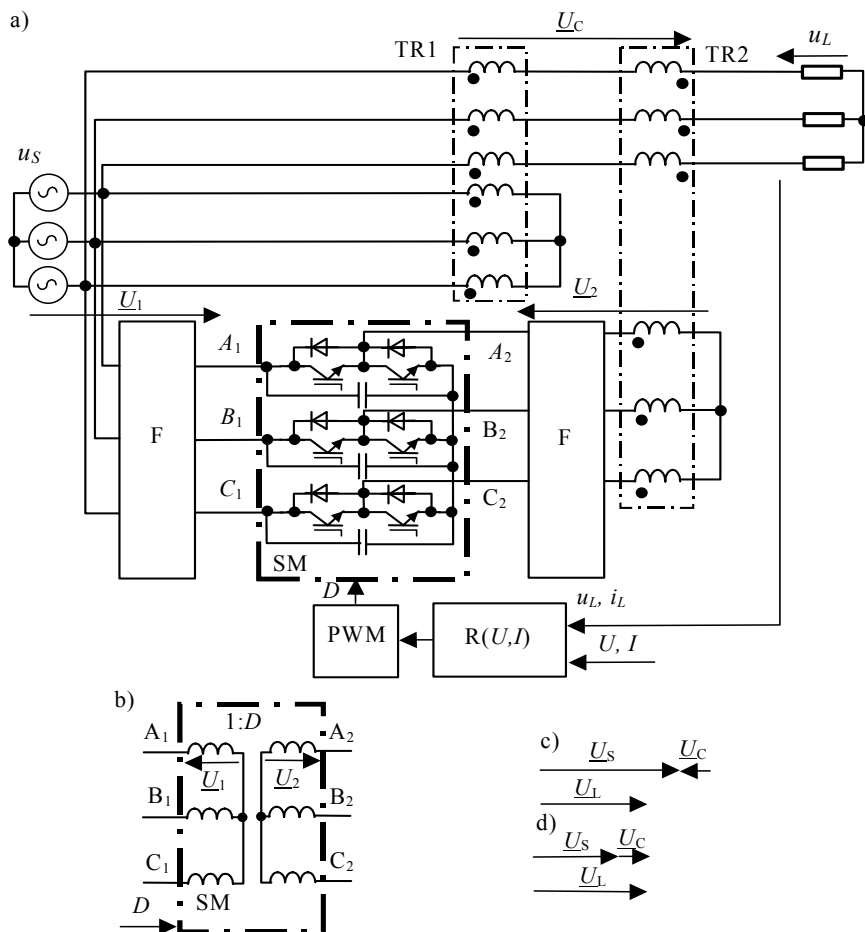
$$\underline{U}_2 = (2D - 1)\underline{U}_1. \quad (5.4)$$

Rozwiązanie trójfazowego układu stabilizatora napięcia przemiennego z SM dwubiegunowym o sterowaniu typu PWM jest podobne (rys. 2.28).

Na rys. 5.8 pokazano trójfazowy układ stabilizatora napięcia przemiennego z SM jednobiegunowym o sterowaniu typu PWM. W tym układzie SM transformuje napięcie przemiennie w funkcji współczynnika wypełnienia impulsu D zgodnie z zależnością (5.1). Umożliwia on jednak tylko zwiększanie lub zmniejszanie napięcia kompensującego. Stąd konieczność stosowania dwóch transformatorów TR1 oraz TR2 do formowania napięcia kompensującego [92].



Rys. 5.7. Układ stabilizatora napięcia przemiennego z SM dwubiegunowym [19], [104],
 a) schemat blokowy, b) model obwodowy uśredniony SM, c), d) wykresy wskazowe napięć przy zmniejszaniu i zwiększaniu napięcia zasilania



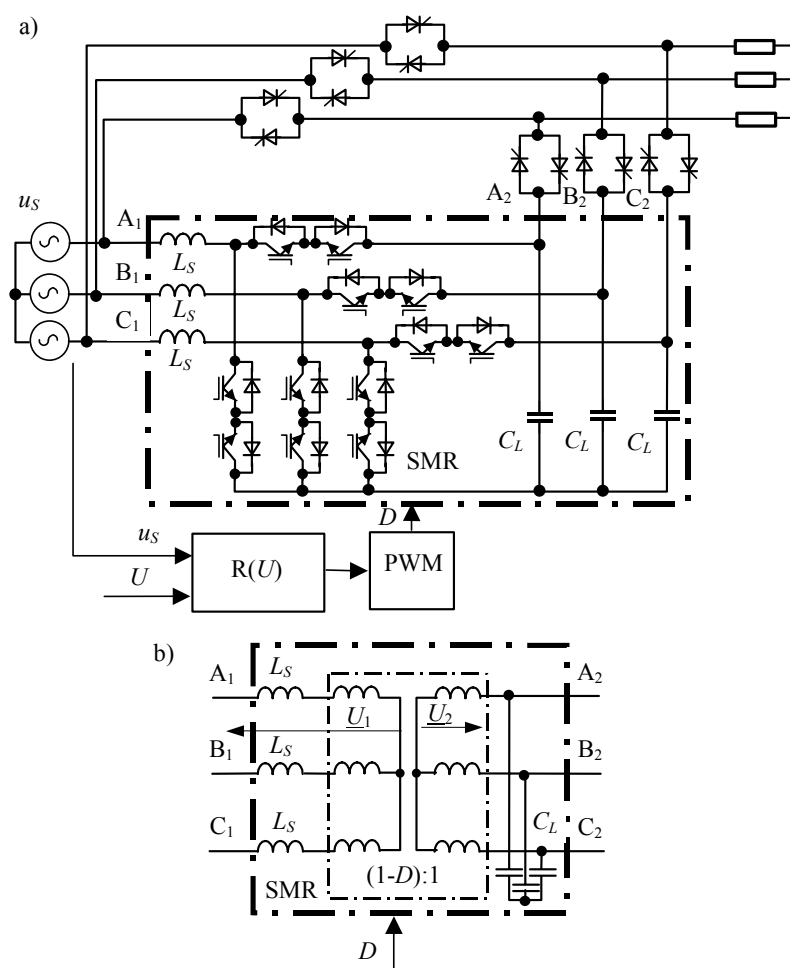
Rys. 5.8. Układ stabilizatora napięcia przemiennego z SM jednobiegunowym [92],
 a) schemat blokowy, b) model obwodowy uśredniony SM, c), d) wykresy wskazowe
 napięć przy zmniejszaniu i zwiększaniu napięcia zasilania

5.3.2. Układ do eliminowania zapadów napięcia przemiennego

Wolnozmiennie wahania napięcia przemiennego są ograniczane za pomocą stabilizatorów napięcia. Na rys. 5.9 pokazano układ, który jest proponowany do eliminowania krótkotrwałych zapadów napięcia (z ang. *voltage sags*). Jako układ transformujący napięcie przemiennie jest w nim wykorzystywany SMR jednobiegunowy o topologii typu boost. Jest on przyłączany do obciążenia za pomocą tyrystorów, jeśli wystąpi zmniejszenie wartości napięcia źródła zasilającego. Idealizowana zależność opisująca transformowanie napięcia w tym układzie jest następująca (tabl. 4.3):

$$\underline{U}_2 = \frac{1}{1-D} \underline{U}_1. \quad (5.5)$$

Pokazany przykład rozwiązania układu do eliminowania krótkotrwałych zapadów napięcia (rys. 5.9) wskazuje na przydatność SMR w takim zastosowaniu. Główną zaletą tego rozwiązania jest brak specjalnego elementu do gromadzenia energii prądu stałego (jak w układach STATCOM) oraz naturalna synchronizacja napięcia wyjściowego SMR z napięciem zasilania.

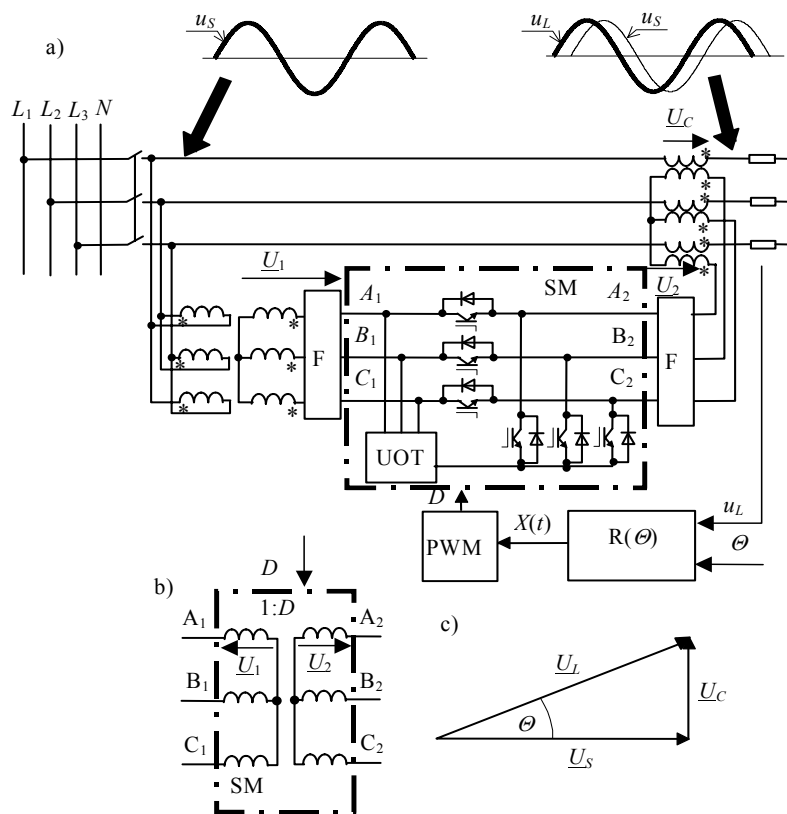


Rys. 5.9. Układ do eliminowania załamów napięcia przemiennego z SMR jednobiegowym o topologii typu boost [102], a) schemat blokowy, b) model obwodowy uśredniony SMR

5.3.3. Przesuwnik fazy napięcia przemiennego

Jednym z urządzeń układów typu FACTS są kwadraturowe przesuwniki fazy napięcia przemiennego. Umożliwiają one zmniejszanie wahań mocy czynnej w systemie energetycznym zgodnie ze znaną zależnością (5.6), przez zmianę przesunięcia fazowego napięcia zasilającego obciążenie [27], [62], [69], [152]. Na rys. 5.10 pokazano przykład rozwiązania układu przesuwnika fazy napięcia przemiennego, w którym jako układ transformujący napięcie przemiennie jest wykorzystany SM jednobiegunowy (rys.2.19) izolowany. Działanie układu ilustruje rys.5.10c.

$$P = \frac{|U_s| |U_L|}{X} \sin \theta . \quad (5.6)$$

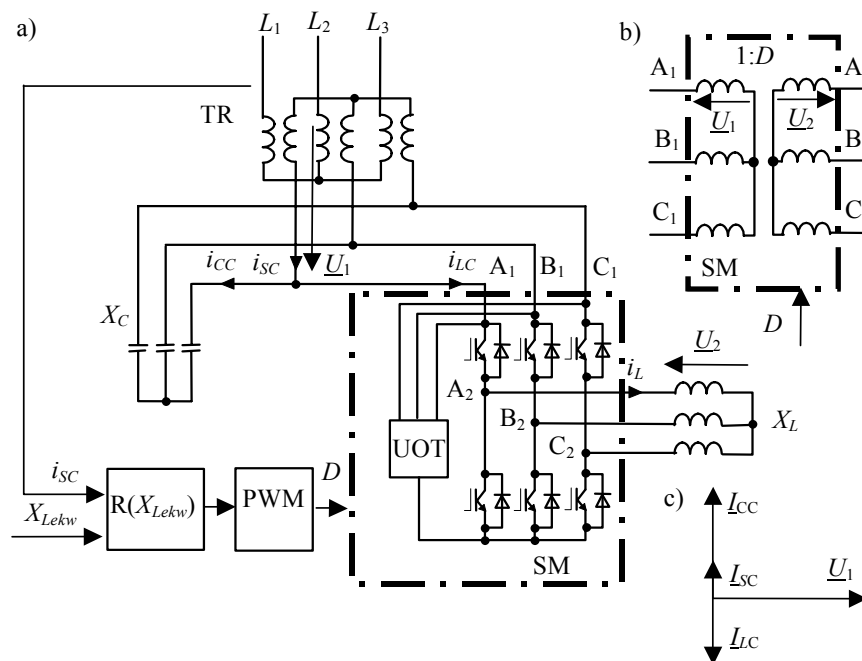


Rys. 5.10. Układ przesuwnika fazy napięcia przemiennego z SM jednobiegunowym izolowanym [152], a) schemat blokowy, b) model obwodowy uśredniony SM, c) wykres wskazowy napięć

5.3.4. Równoległe kompensatory mocy biernej

Układy transformujące napięcie przemiennie są również stosowane jako transformatory impedancji do generowania lub absorbowania mocy biernej. Przykłady realizacji takich układów pokazano na rysunkach 5.11 oraz 5.12. W pierwszym układzie jest stosowany SM jednobiegunowy, który umożliwia zmianę wartości reaktancji indukcyjnej w funkcji współczynnika wypełnienia impulsu D zgodnie z zależnością (5.7) [96]. W drugim układzie jest stosowany SMR jednobiegunowy o topologii typu Ćuk (rysunki 2.44, 2.45), którego impedancja wejściowa może mieć charakter indukcyjny lub pojemnościowy, a jej moduł jest funkcją współczynnika D [17], [31], [33] – [35].

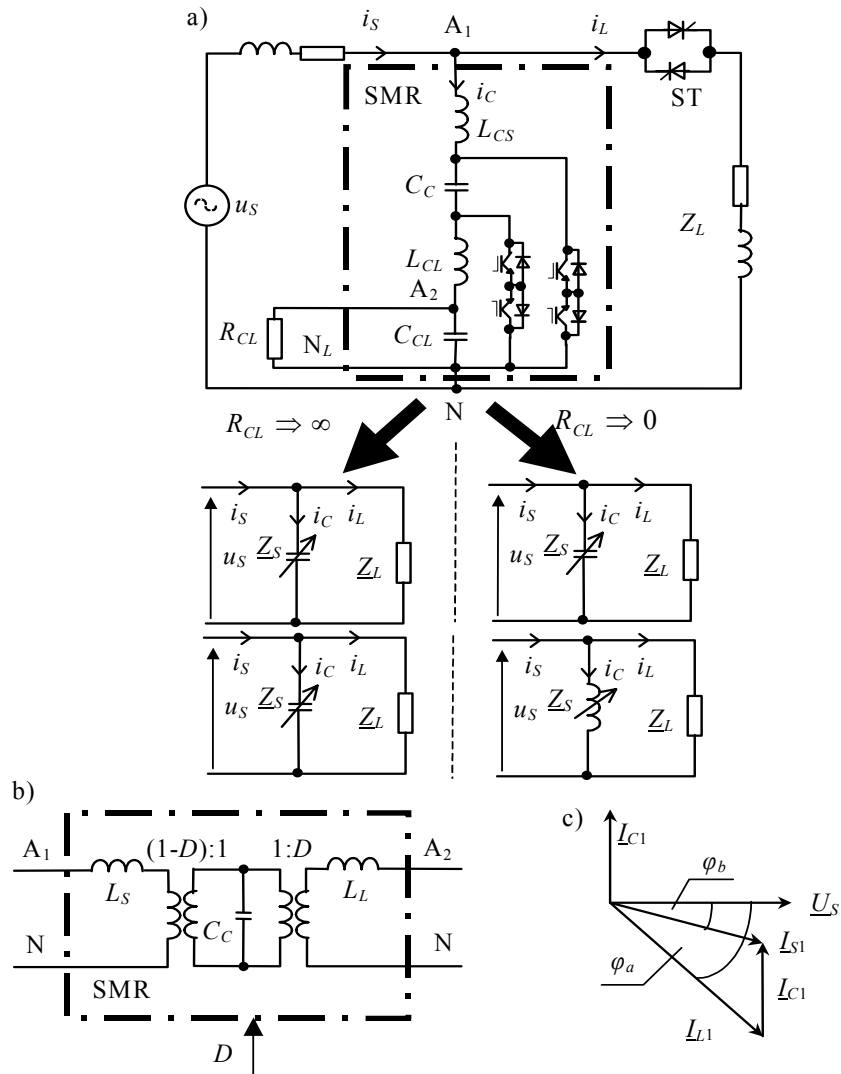
$$X_{Lekw} = \frac{X_L}{D^2}. \quad (5.7)$$



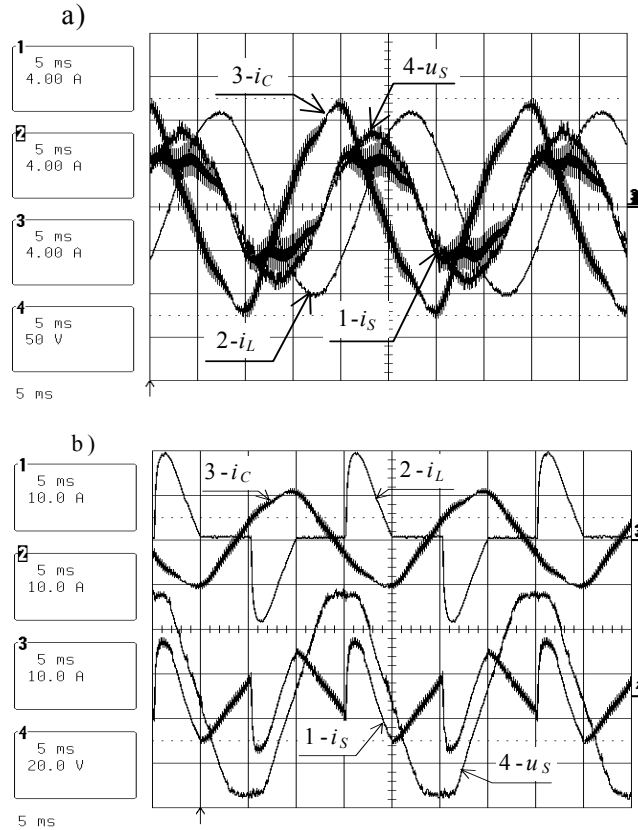
Rys. 5.11. Układ kompensatora mocy biernej z SM jednobiegunowym [96], a) schemat blokowy, b) model obwodowy uśredniony SM, c) wykres wskazowy prądów

Koncepcja wykorzystania SMR jednobiegunowego o topologii typu Ćuk (rys. 5.12) powstała podczas badań właściwości układu z tym SMR. To rozwiązanie jest przykładem wykorzystania wielu stopni swobody, jakie występują przy kształtowaniu funkcji układowych SMR. Przykłady oscylogra-

mów napięć i prądów, które otrzymano podczas badań omawianego układu z obciążeniem rezystancyjnym sterowanym za pomocą sterownika tyrystorowego ST (rys. 5.12a), pokazano na rys. 5.13.



Rys. 5.12. Układ kompensatora mocy biernej z SMR jednobiegunowym o topologii typu Čuk [17], a) uproszczony schemat ideowy, b) model obwodowy uśredniony SMR, c) wykres wskazowy harmonicznych podstawowych prądów

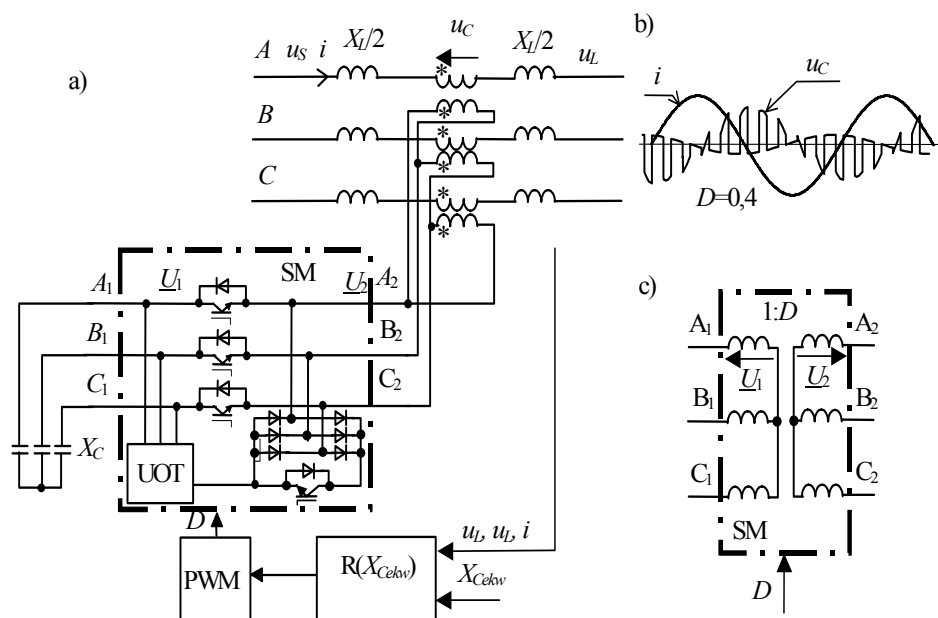


Rys. 5.13. Oscylogramy napięcia i prądów w układzie jak na rys.5.12a, a) w stanie kompensacji przy pełnym wysterowaniu ST, b) w stanie kompensacji przy kącie załączenia ST, $\theta_z \approx \pi/2$; i_S – prąd źródła zasilania, i_L – prąd obciążenia, i_C – prąd wejściowy SMR, u_S – napięcie zasilania (z uwzględnieniem impedancji wewnętrznej źródła)

5.3.5. Szeregowy kompensator pojemnościowy

Inny przykład zastosowania układu transformującego napięcie przemiennie jako transformatora impedancji jest pokazany na rys. 5.14. W tej realizacji układu typu FACTS występuje transformowanie reaktancji pojemnościowej X_C za pomocą SM zgodnie z zależnością 5.8 (tabl. 4.1). W efekcie uzyskujemy możliwość zmiany wartości pojemności włączanej szeregowo z indukcyjnościami systemu transmisji energii elektrycznej (rys. 5.14) [97].

$$X_{Cekw} = D^2 X_C. \quad (5.8)$$

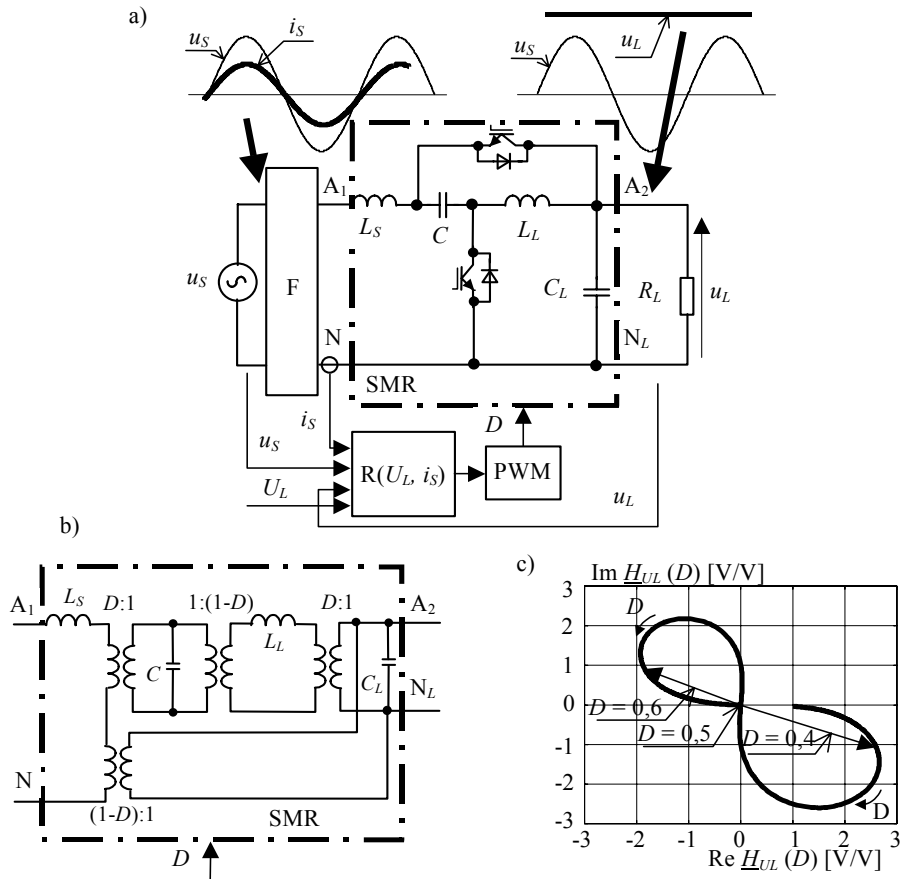


Rys. 5.14. Układ szeregowego kompensatora pojemnościowego z SM jednobiegunowym [97], a) schemat blokowy, b) przebieg czasowy prądu linii i napięcia kompensującego c) model obwodowy uśredniony SM

5.4. Bezpośrednie przekształtniki prądu przemiennego na prąd stały

W tym obszarze zastosowań proponuje się wykorzystanie układu transformującego napięcie przemiennie do bezpośredniego przekształcania prądu przemiennego na prąd stały (typu AC/DC). Koncepcja tego rozwiązania polega na transformowaniu dodatnich i ujemnych półokresów napięcia przemiennego odpowiednio z dodatnim i ujemnym współczynnikiem transformacji napięcia [64], [67], [68]. Jest to alternatywny sposób przekształcania prądu przemiennego na prąd stały w odniesieniu do stosowanych rozwiązań. Na rys. 5.15 pokazano jednofazowy układ takiego przekształtnika z SMR dwubiegunowym o topologii typu Ćuk B1 (rysunki rys. 2.54, rys. 2.60 oraz rys. 2.61). Podobnie jest realizowany układ trójfazowy (rysunki 2.62a oraz 2.63) [67], [68]. Idealizowana zależność opisująca transformowanie napięcia w tym układzie jest następująca (tabl.4.4):

$$\underline{U}_2 = \frac{(1-D)}{(1-2D)} \underline{U}_1. \quad (5.9)$$



Rys. 5.15. Układ przekształtnika prądu przemiennego na prąd stały (AC/DC) z SMR dwubiegunowym o topologii typu Čuk B1 [64], a) uproszczony schemat idealowy, b) model obwodowy uśredniony, c) charakterystyka amplitudowo-fazowa transmitancji napięciowej w warunkach dopasowania (4.1)

5.5. Podsumowanie

- Obszar proponowanych zastosowań impulsowych układów transformujących napięcia przemiennie obejmuje: sterowniki napięcia, prądu oraz mocy obciążenia w układach prądu przemiennego, układy typu FACTS oraz bezpośrednie przekształtniki prądu przemiennego na prąd stały (AC/DC) (rys. 5.1).
- W zastosowaniach omawianych układów jako sterowników prądu przemiennego są wykorzystywane głównie SM oraz układy hybrydowe z tymi ste-

rownikami (rysunki 5.2 – 5.6). Propozycje obejmujące zastosowania SMR jako sterowników prądu przemiennego (umożliwiają beztransformatorowe zwiększanie napięcia wyjściowego) dotyczą, jak dotychczas, bardzo wąskiej grupy SMR (rysunki 5.3 oraz 5.4).

- Zastosowania w układach typu FACTS obejmują wykorzystanie omawianych układów: w stabilizatorach napięcia (SM, rysunki 5.7, 5.8), w układach do eliminowania krótkotrwałych zapadów napięcia (SMR, rys. 5.9), w przesuwnikach fazy napięcia (SM, rys. 5.10), w równoległych i szeregowych kompensatorach reaktancyjnych (SM, rysunki 5.11 oraz 5.14, SMR, rys. 5.12). W tych ostatnich, SM oraz SMR są wykorzystywane do transformowania impedancji.
- W zastosowaniach omawianych układów jako przekształtników prądu przemiennego na prąd stały (AC/DC) są wykorzystywane SMR dwubiegunowe (rys. 5.15). Jest to alternatywny do stosowanych rozwiązań sposób przekształcania polegający na transformowaniu dodatnich i ujemnych półokresów napięcia przemiennego odpowiednio z dodatnim i ujemnym współczynnikiem transformacji napięcia (rys. 5.15c).
- Zdaniem autora wykorzystanie impulsowych układów transformujących napięcia przemiennie w przedstawionych obszarach zastosowań będzie rozwijane. Dotyczy to zwłaszcza wykorzystania SMR oraz układów hybrydowych z tymi sterownikami. Głównym czynnikiem przyspieszającym ten rozwój będzie poprawa współczynnika sprawności SM oraz SMR.