



AGH



Euro - Centrum

Studia Podyplomowe

EFEKTYWNE UŻYTKOWANIE ENERGII ELEKTRYCZNEJ

w ramach projektu

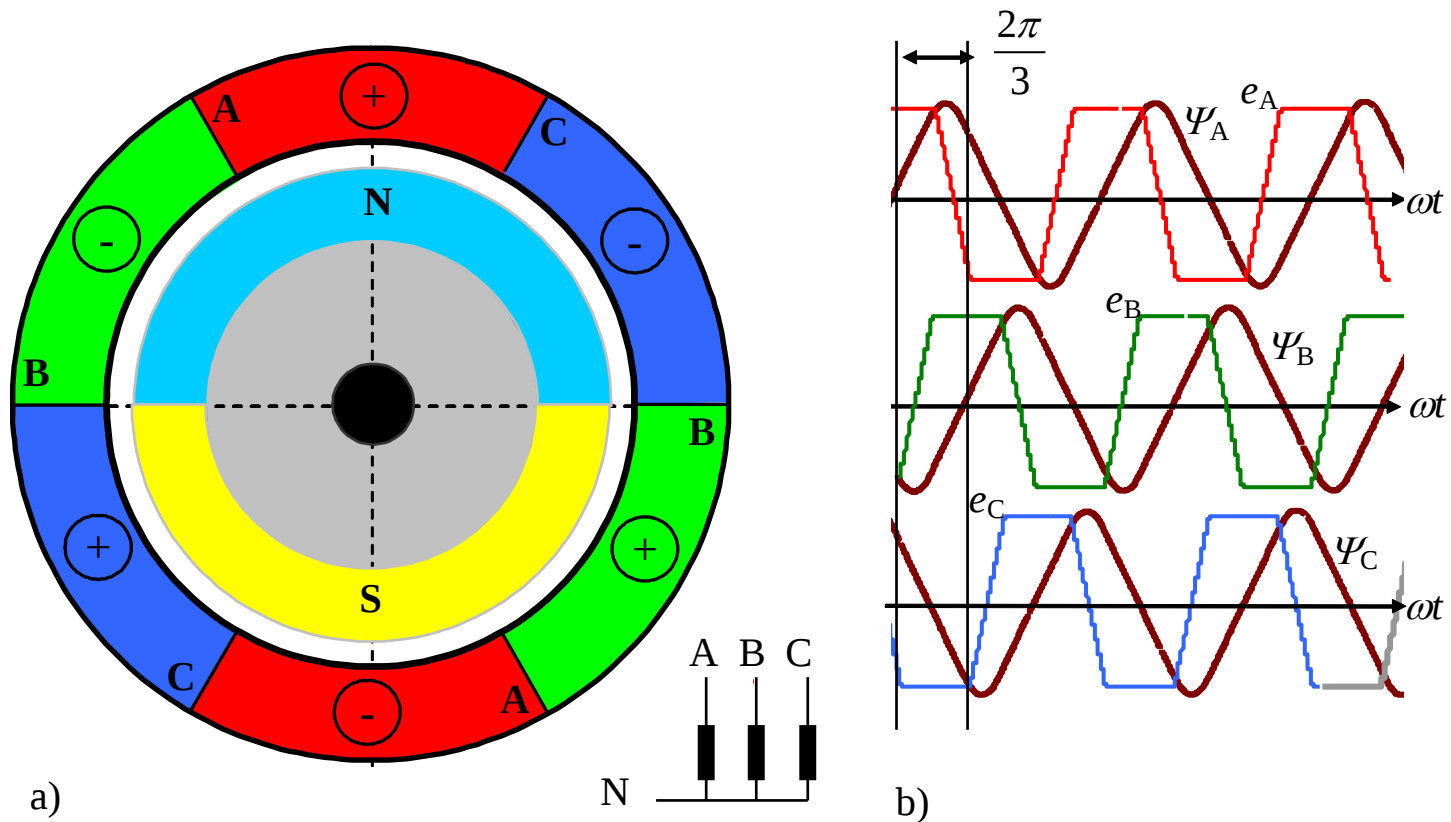
**Śląsko-Małopolskie Centrum Kompetencji
Zarządzania Energią**

Maszyna bezszczotkowa o magnesach trwałych BLDCPM

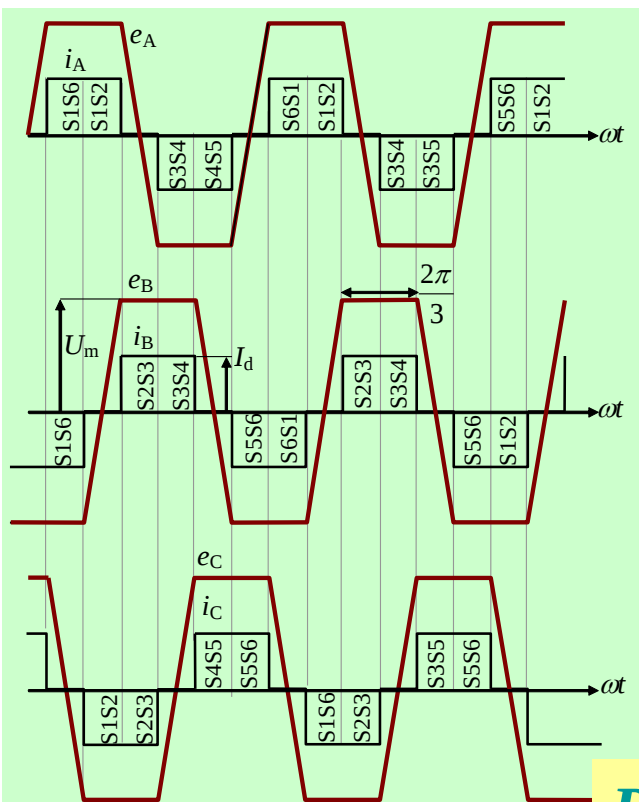
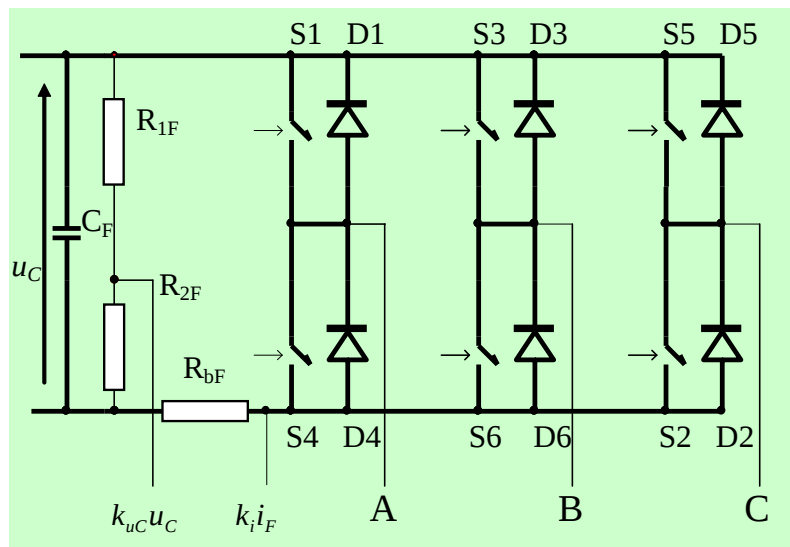
Prof. dr hab. inż. Stanisław Piróg

Katedra Automatyki Napędu i Urządzeń Przemysłowych AGH
tel. 012 617 39 43
pirog@agh.edu.pl

Napęd z trójfazową maszyną bezszczotkową o magnesach trwałych

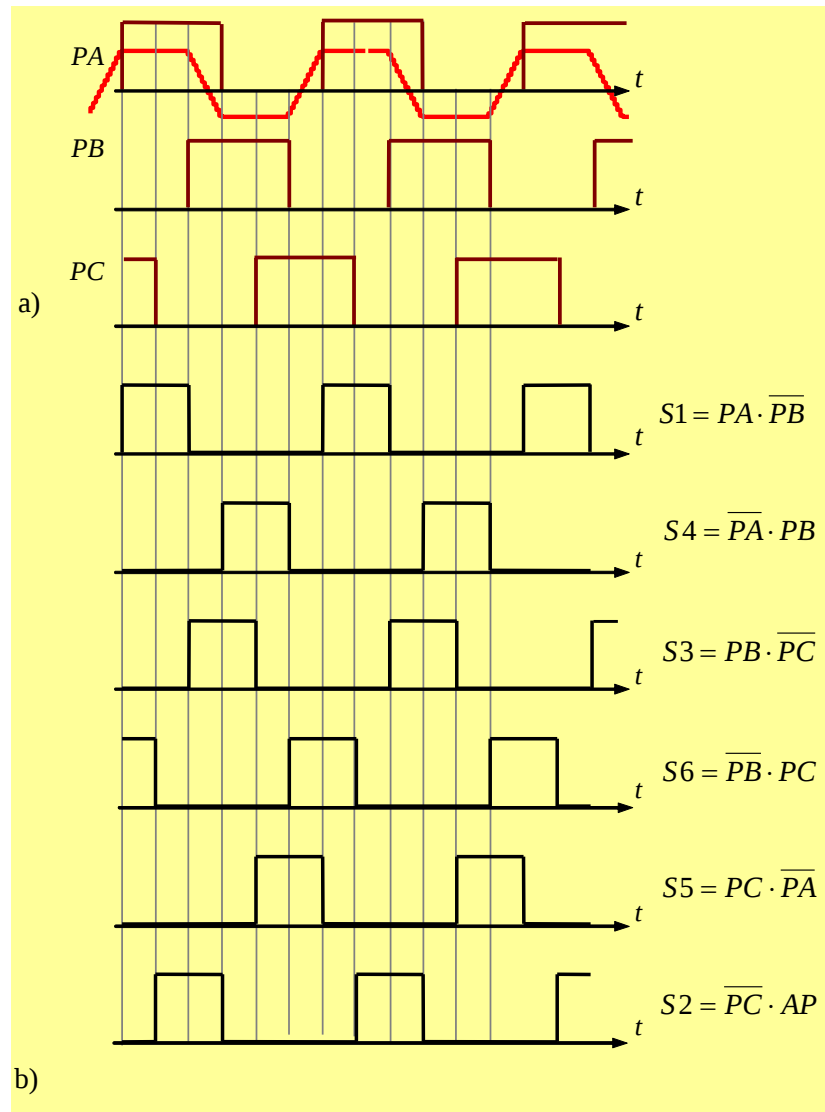


Poprzeczny przekrój maszyny BDCPM (a), przebiegi napięć wewnętrznych (b)

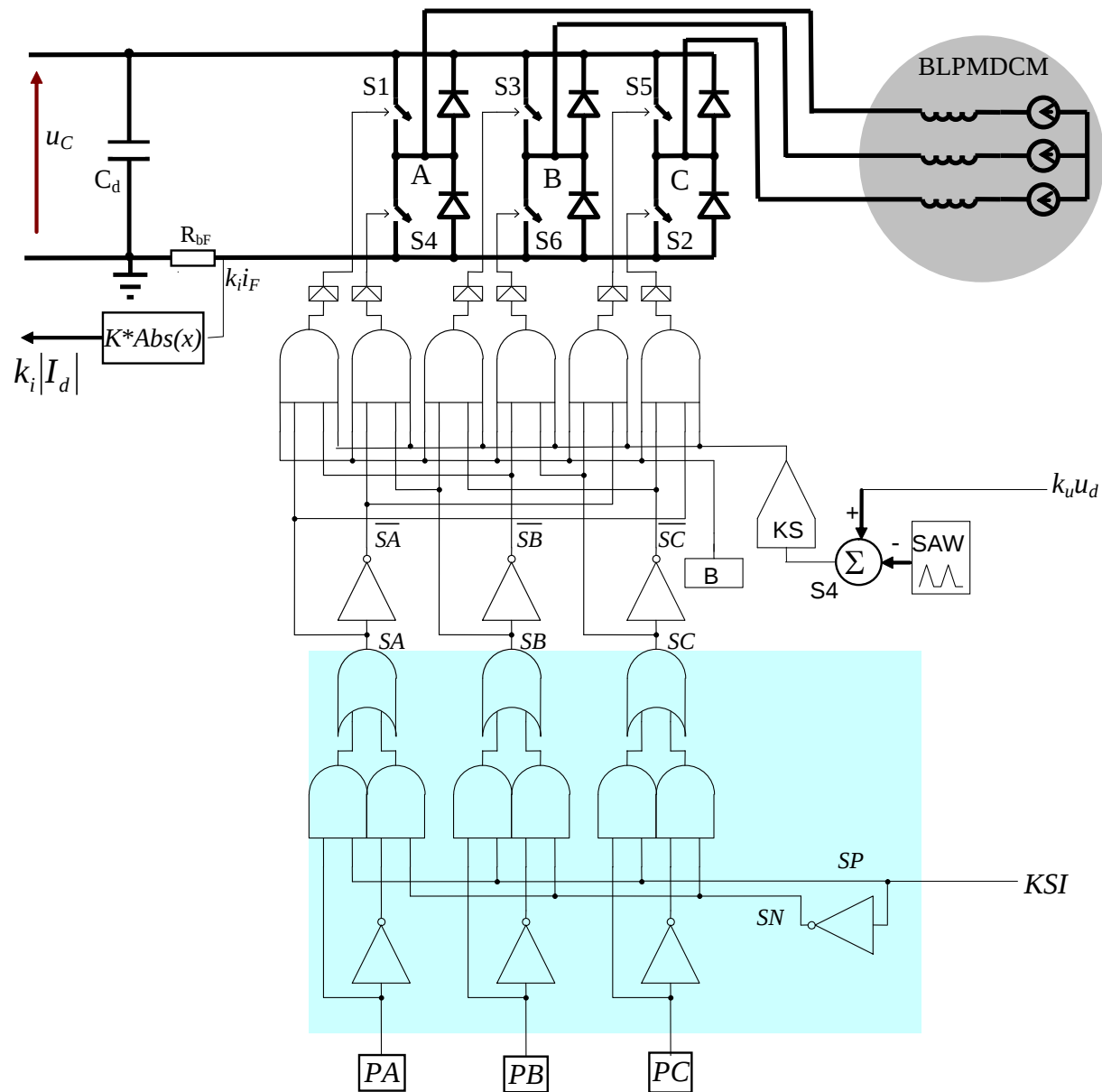


$$p = p_A + p_B + p_C = 2I_d U_m = P$$

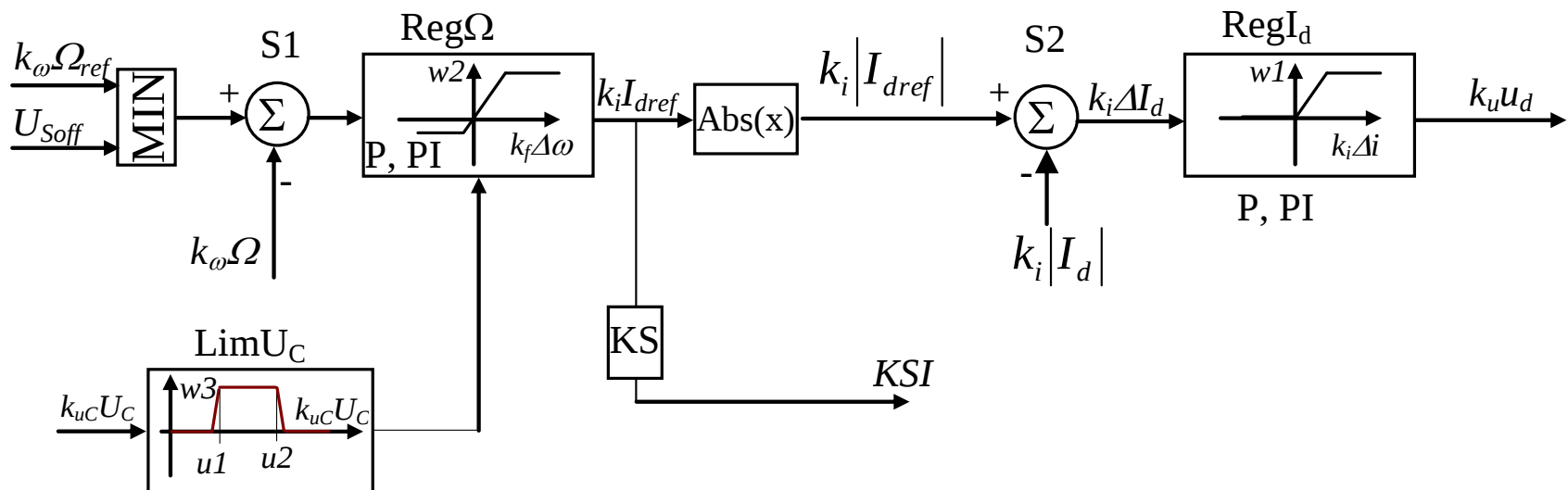
$$P = 2U_m I_d$$



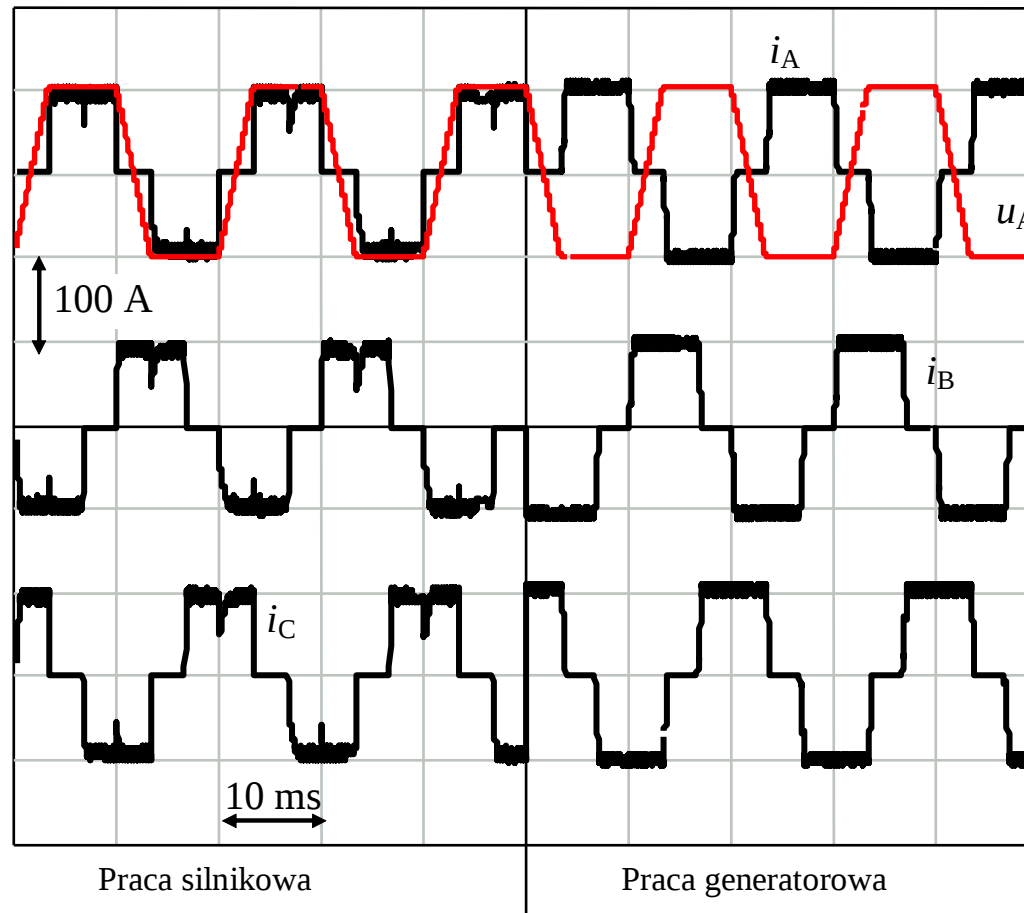
- a) Impulsy czujnika położenia wirnika,
b) Przedziały czasu, w których impulsowane są poszczególne łączniki trójfazowego falownika napięcia kształtującego przebiegi prądów bezszcawkowej maszyny prądu stałego



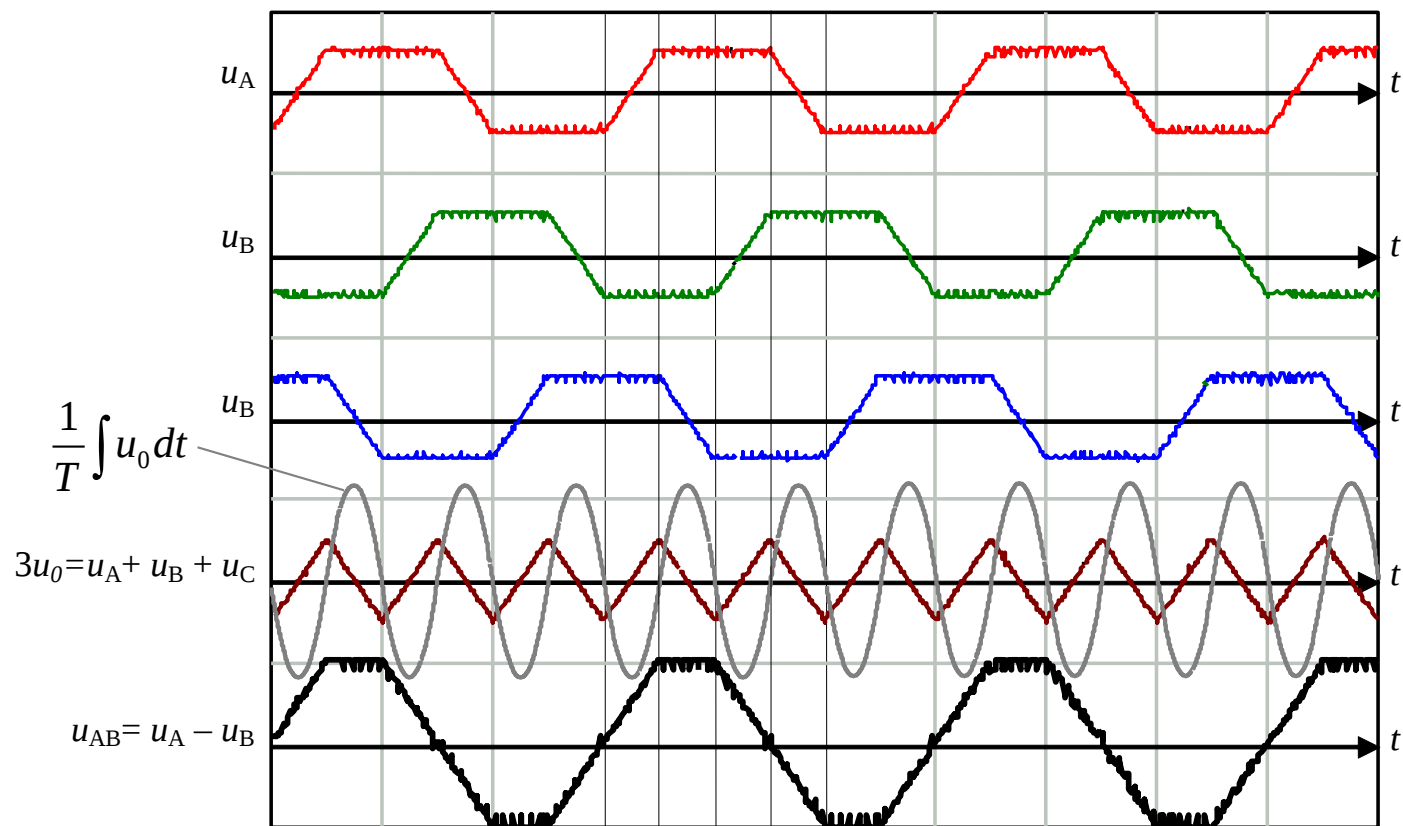
Schemat napędu z trójfazową bezszczotkową maszyną o magnesach trwałych i falownikiem napięcia (wraz z układem sterowania)



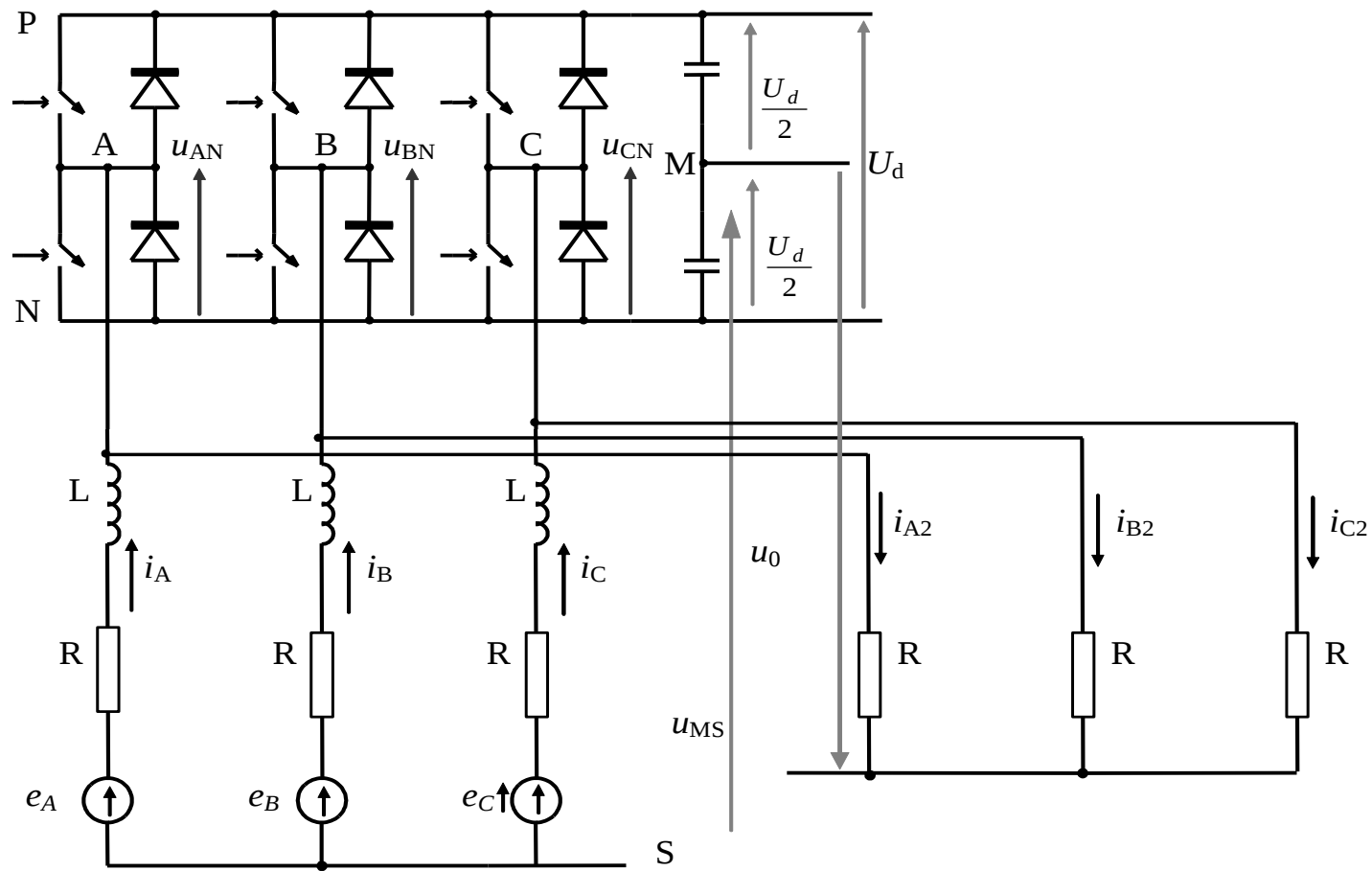
Schemat blokowy układu regulacji prędkości jednokierunkowego napędu z silnikiem bezszczotkowym prądu stałego



Przebiegi prądów fazowych maszyny bezszczotkowej i skokowe przejście z pracy silnikowej na pracę generatorową

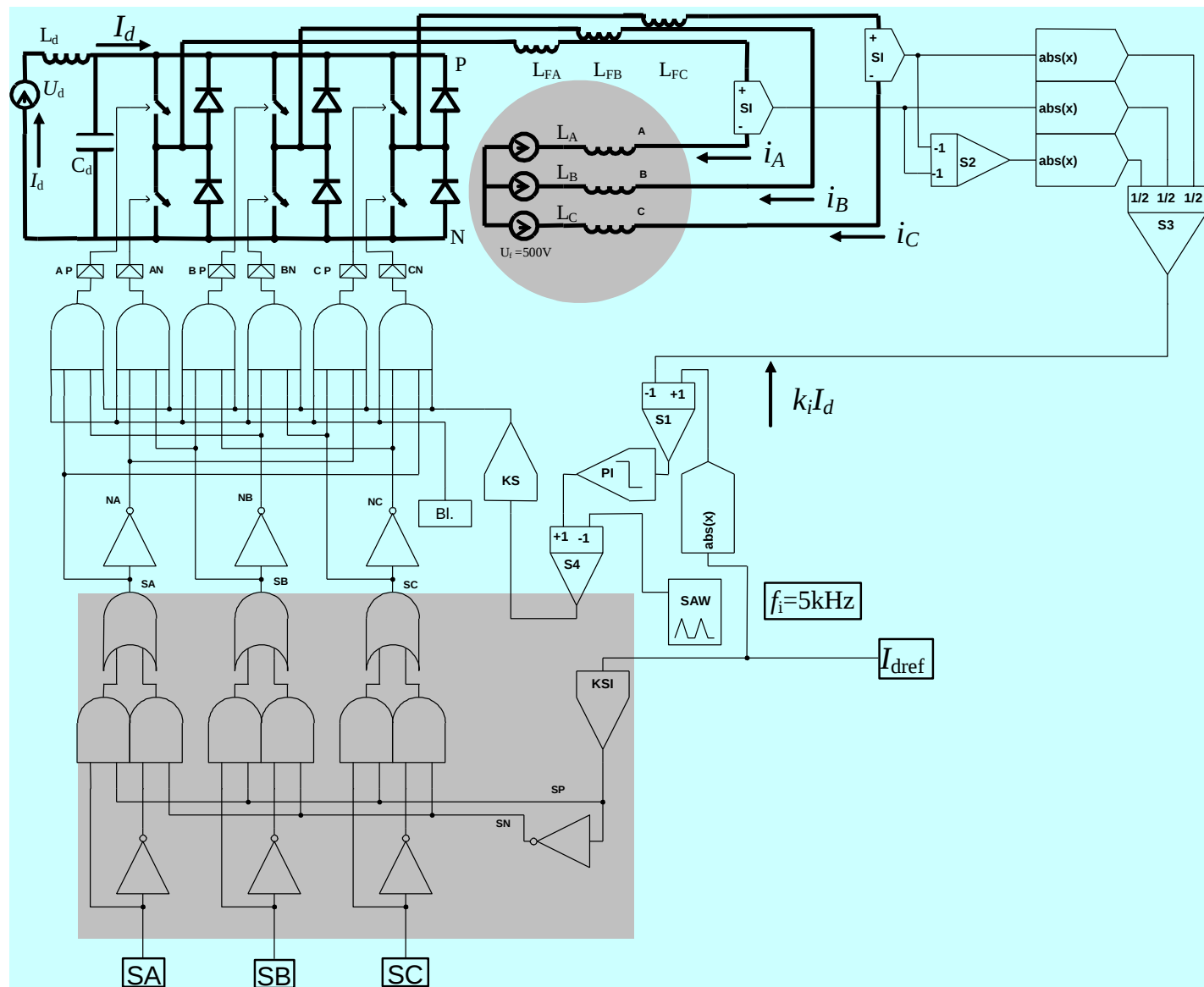


Przebiegi napięć fazowych, składowej kolejności zerowej
i jednego napięcia międzyfazowego maszyny bezszczotkowej prądu stałego

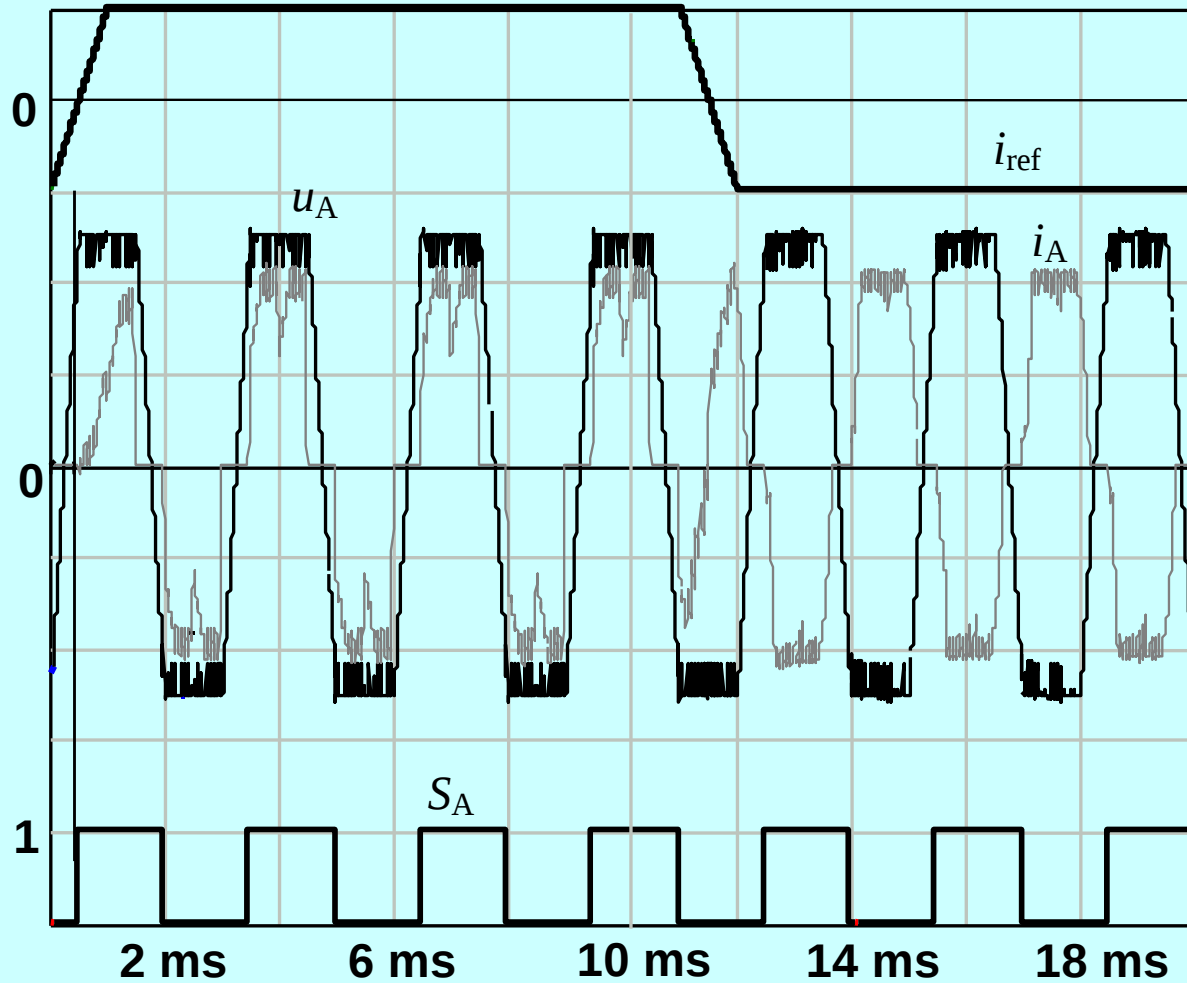


Sposób wyznaczania składowej kolejności zerowej napięcia maszyny

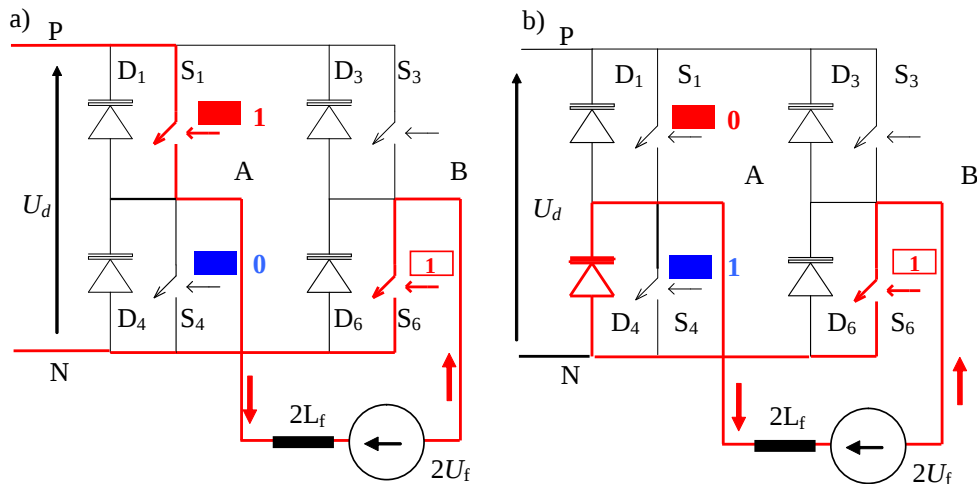
Przekształtnik energoelektroniczny



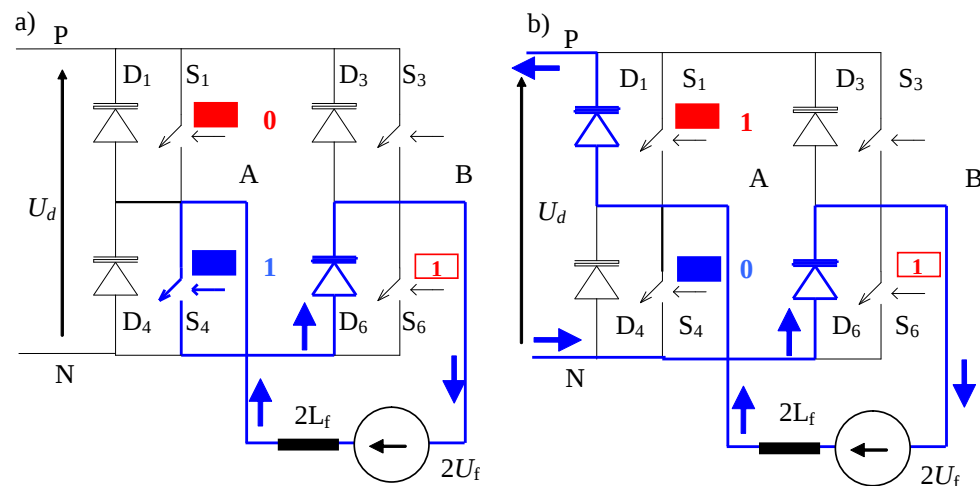
Przebiegi napięć i prądów maszyny



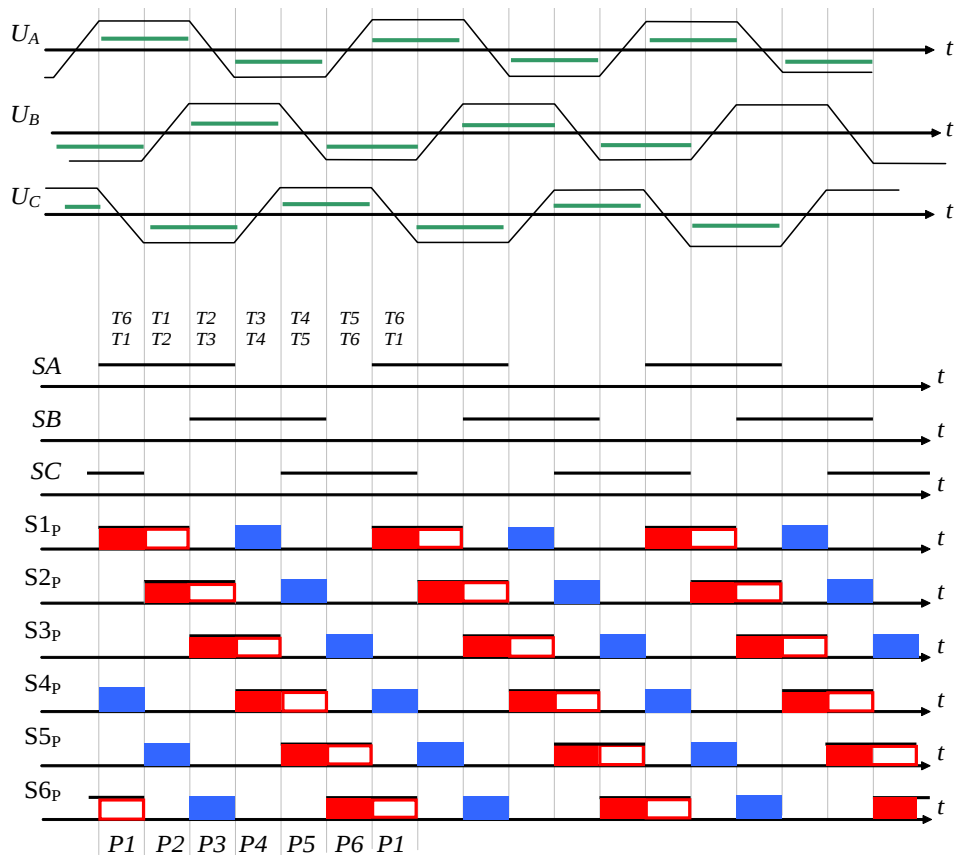
Modulacja unipolarna w falowniku bezszczotkowej maszyny prądu stałego



Praca silnikowa – stan P1



Praca generatorowa – stan P1



$$P1 = SA \cdot SC$$

$$P2 = \overline{SB} \cdot \overline{SC}$$

$$P3 = SA \cdot SB$$

$$P4 = \overline{SA} \cdot \overline{SC}$$

$$P5 = SB \cdot SC$$

$$P6 = \overline{SA} \cdot SB$$

Impulsy PWM

Przewodzenie ciągłe

Zanegowane impulsy PWM

Prąd fazy

– silnik,

– silnik,

– hamowanie

$$S1_p = P1 \cdot K \vee P2 \vee P4 \cdot \overline{K}$$

$$S4_p = P4 \cdot K \vee P5 \vee P1 \cdot \overline{K}$$

$$S3_p = P3 \cdot K \vee P4 \vee P6 \cdot \overline{K}$$

$$S6_p = P6 \cdot K \vee P1 \vee P3 \cdot \overline{K}$$

$$S5_p = P5 \cdot K \vee P6 \vee P2 \cdot \overline{K}$$

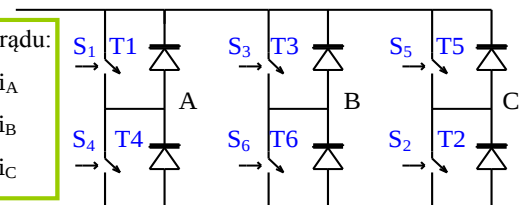
$$S2_p = P2 \cdot K \vee P3 \vee P5 \cdot \overline{K}$$

Pomiar prądu:

SA → i_A

SB → i_B

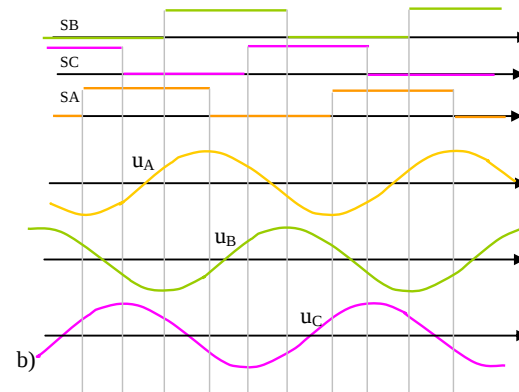
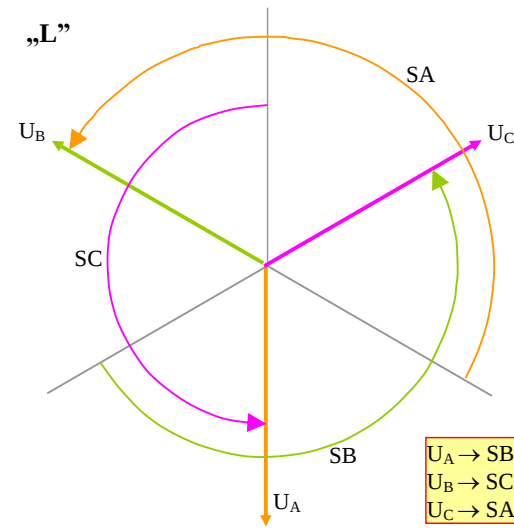
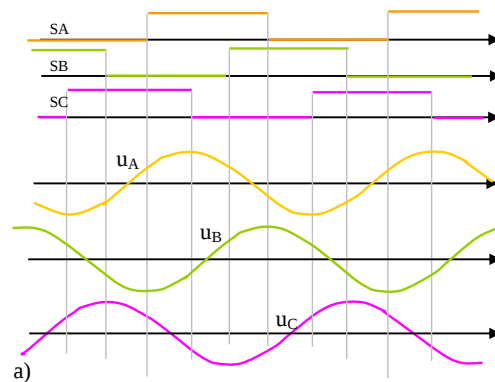
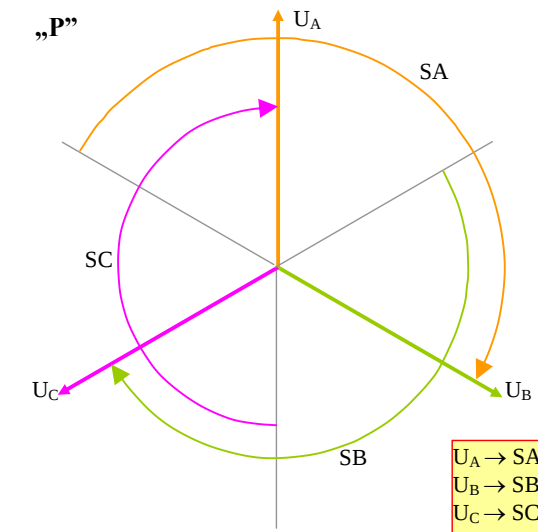
SC → i_C

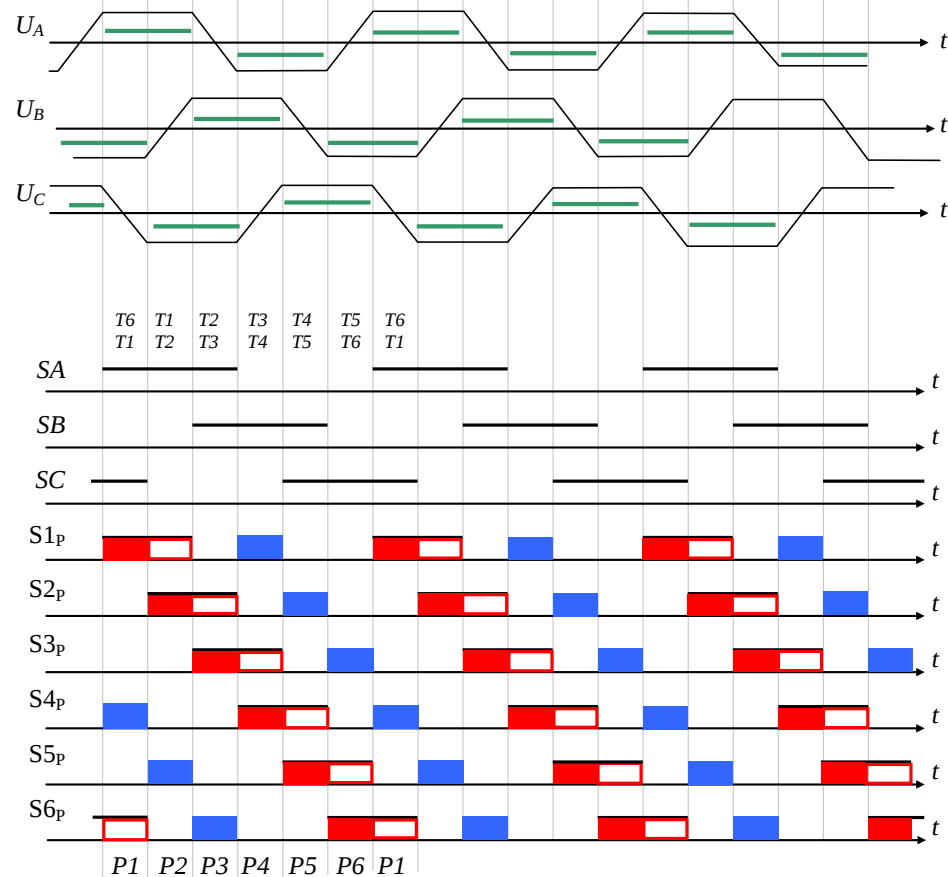


Wirowanie w prawo (P)

Zmiana kierunku silnika bezszczotkowego

Przyporządkowanie impulsów z czujnika położenia wirnika





$$P1 = SA \cdot SC$$

$$P2 = \overline{SB} \cdot \overline{SC}$$

$$P3 = SA \cdot SB$$

$$P4 = \overline{SA} \cdot \overline{SC}$$

$$P5 = SB \cdot SC$$

$$P6 = \overline{SA} \cdot \overline{SB}$$

Impulsy PWM

Przewodzenie ciągłe

Zanegowane impulsy PWM

Prąd fazy

– silnik,

– silnik,

– hamowanie

$$S1_p = P1 \cdot K \vee P2 \vee P4 \cdot \overline{K}$$

$$S4_p = P4 \cdot K \vee P5 \vee P1 \cdot \overline{K}$$

$$S3_p = P3 \cdot K \vee P4 \vee P6 \cdot \overline{K}$$

$$S6_p = P6 \cdot K \vee P1 \vee P3 \cdot \overline{K}$$

$$S5_p = P5 \cdot K \vee P6 \vee P2 \cdot \overline{K}$$

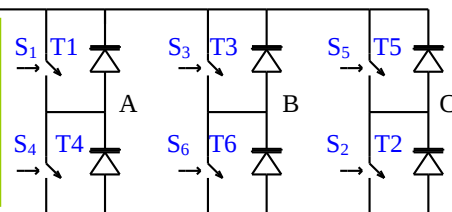
$$S2_p = P2 \cdot K \vee P3 \vee P5 \cdot \overline{K}$$

Pomiar prądu:

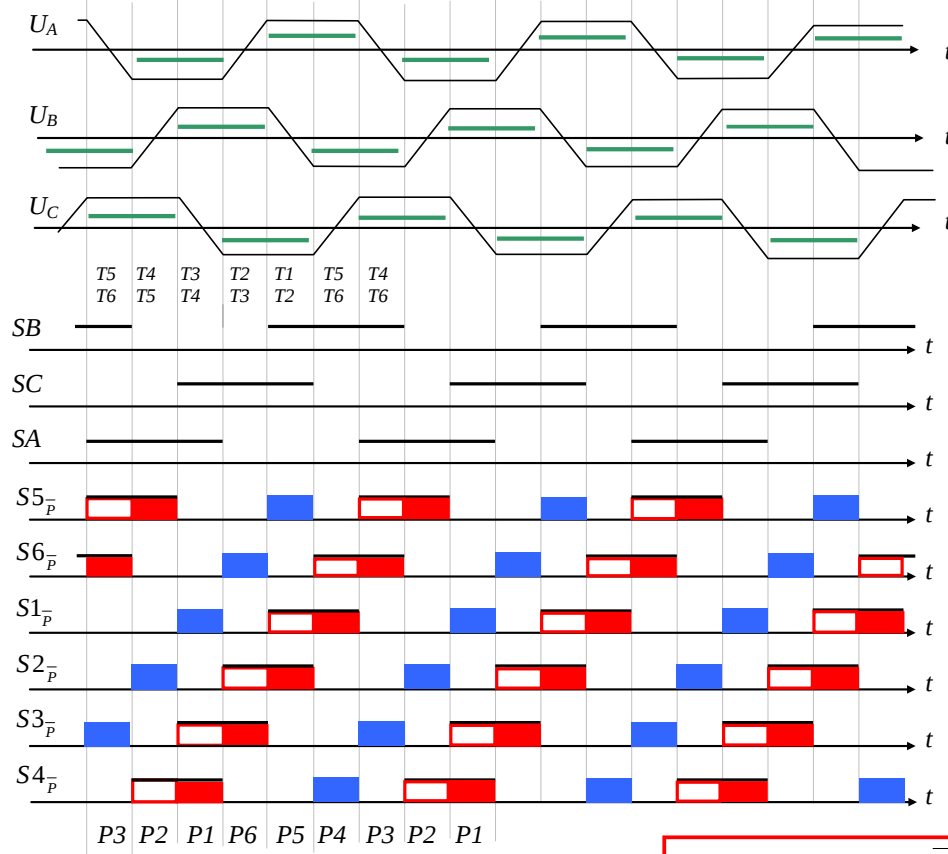
SA → i_A

SB → i_B

SC → i_C



Wirowanie w prawo (P)



$$P1 = SA \cdot SC$$

$$P2 = SB \cdot SC \quad \text{Impulsy PWM}$$

$$P3 = SA \cdot SB \quad \text{Przewodzenie ciągłe}$$

$$P4 = SA \cdot SC \quad \text{Zanegowane impulsy PWM}$$

$$P5 = SB \cdot SC$$

$$P6 = SA \cdot SB \quad \text{Prąd fazy}$$

– silnik,

– silnik,

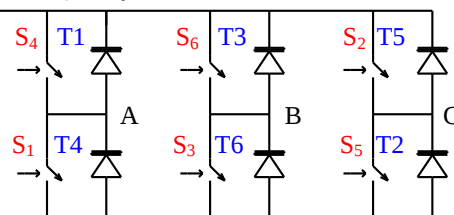
– hamowanie

Pomiar prądu:

$$SA \rightarrow i_C$$

$$SB \rightarrow i_A$$

$$SC \rightarrow i_B$$



$$S4_p = P1 \cdot K \vee P2 \vee P4 \cdot \bar{K} = S1_p$$

$$S1_p = P4 \cdot K \vee P5 \vee P1 \cdot \bar{K} = S4_p$$

$$S6_p = P3 \cdot K \vee P4 \vee P6 \cdot \bar{K} = S3_p$$

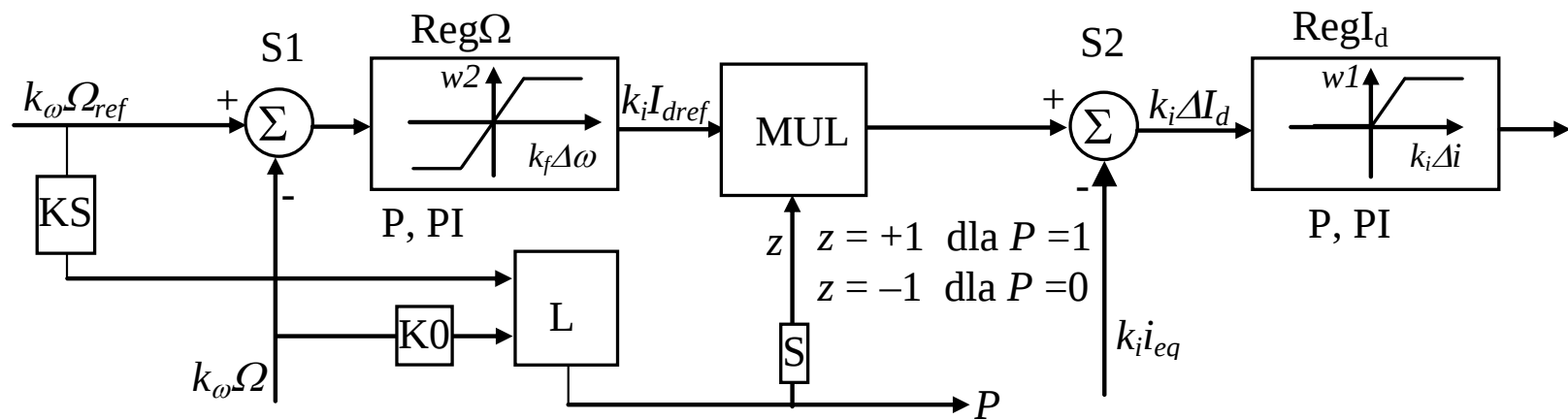
$$S3_p = P6 \cdot K \vee P1 \vee P3 \cdot \bar{K} = S6_p$$

$$S2_p = P5 \cdot K \vee P6 \vee P2 \cdot \bar{K} = S5_p$$

$$S5_p = P2 \cdot K \vee P3 \vee P5 \cdot \bar{K} = S2_p$$

Wirowanie w lewo ($\bar{P}$)

. Zależności czasowe w układzie sterowania falownikiem silnika bezszczotkowego (wirowanie w lewo bez zmiany uporządkowania impulsów z czujnika położenia wirnika)



Struktura układu dwukierunkowej regulacji prędkości silnika bezszczotkowego zasilanego poprzez trójfazowy falownik napięcia z modulacją unipolarną

Logiczny sygnał P powoduje przełączenie struktury logicznej adresowania sygnałów zgodnie z zależnościami:

$$S1' = S1 \cdot P \vee S4 \cdot \bar{P}$$

$$S2' = S2 \cdot P \vee S5 \cdot \bar{P}$$

$$S3' = S3 \cdot P \vee S6 \cdot \bar{P}$$

$$S4' = S4 \cdot P \vee S1 \cdot \bar{P}$$

$$S5' = S5 \cdot P \vee S2 \cdot \bar{P}$$

$$S6' = S6 \cdot P \vee S3 \cdot \bar{P}$$

i sygnałów ustalających znak ekwiwalentnego prądu stałego:

$$SA' = SA \cdot P \vee SB \cdot \bar{P}$$

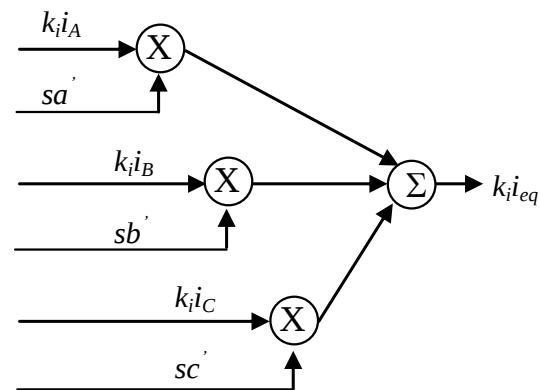
$$SB' = SB \cdot P \vee SC \cdot \bar{P}$$

$$SC' = SC \cdot P \vee SA \cdot \bar{P}$$

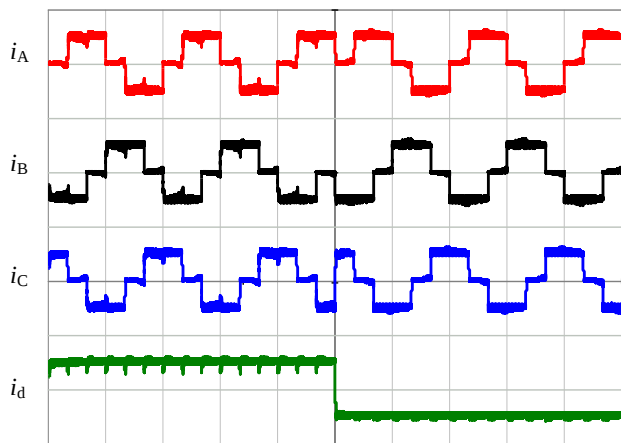
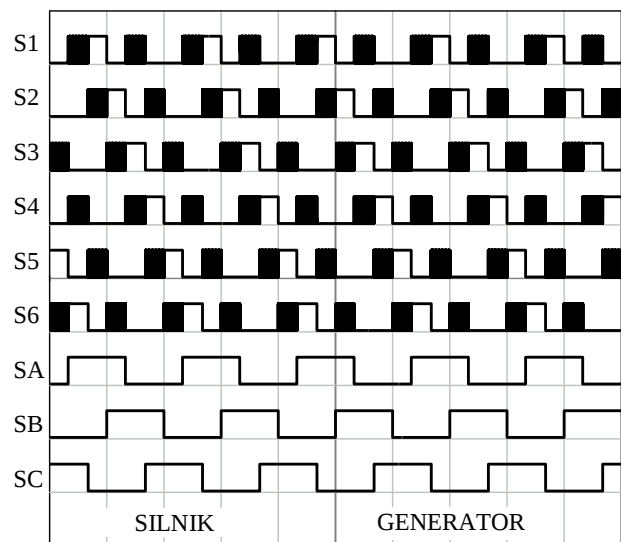
$$sa' = \begin{cases} +1 & SA' = 1 \\ -1 & SA' = 0 \end{cases}$$

$$sb' = \begin{cases} +1 & SB' = 1 \\ -1 & SB' = 0 \end{cases}$$

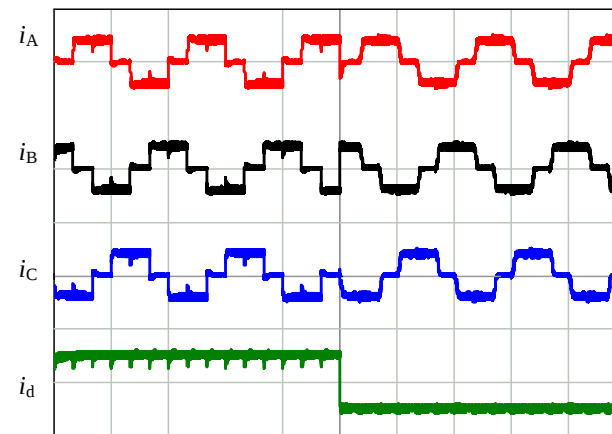
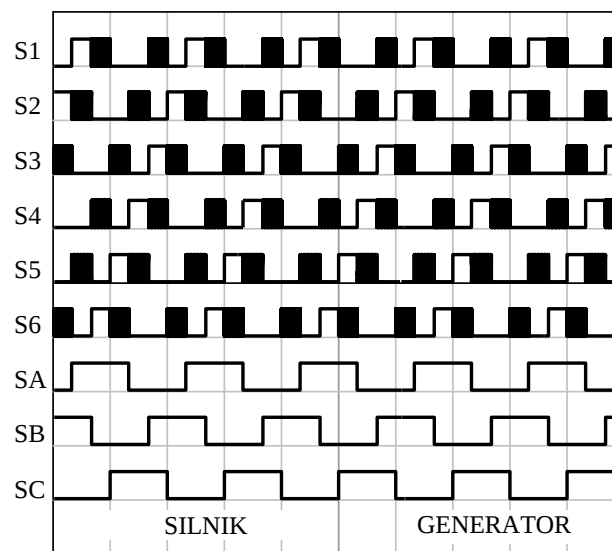
$$sc' = \begin{cases} +1 & SC' = 1 \\ -1 & SC' = 0 \end{cases}$$



Struktura pomiaru zastępczego prądu stałego dla silnika bezszczotkowego w napędzie dwukierunkowym

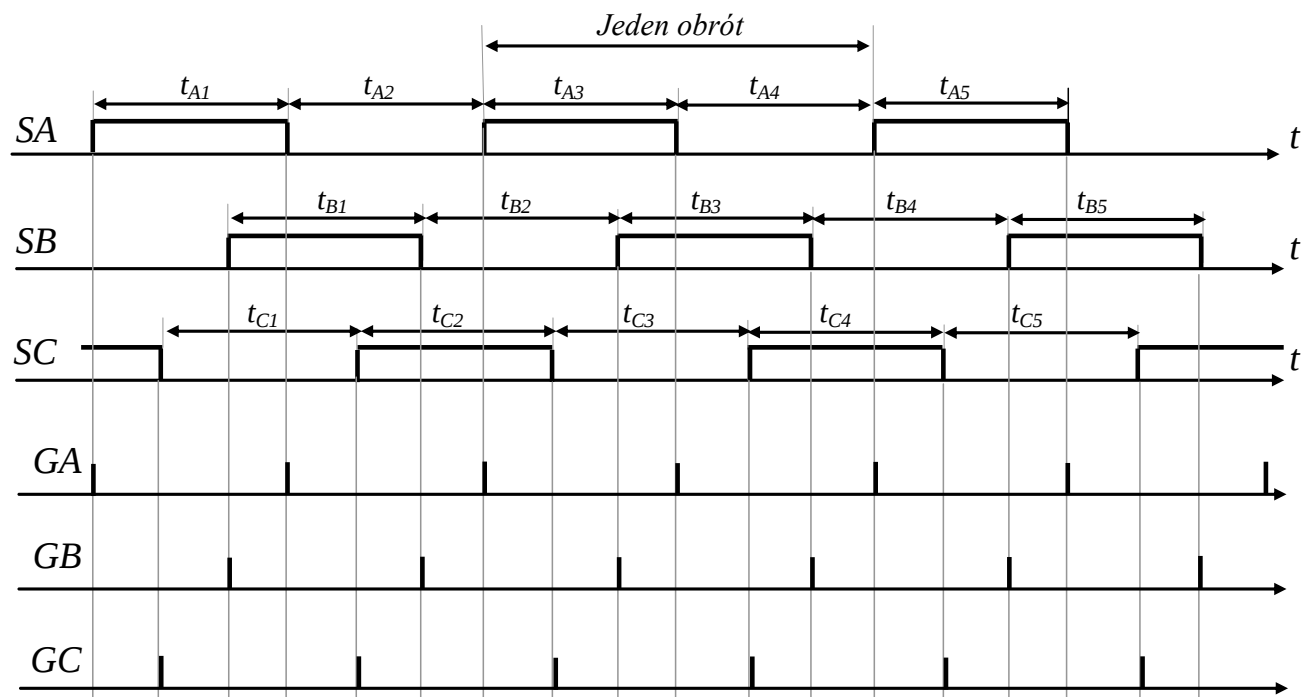


a)



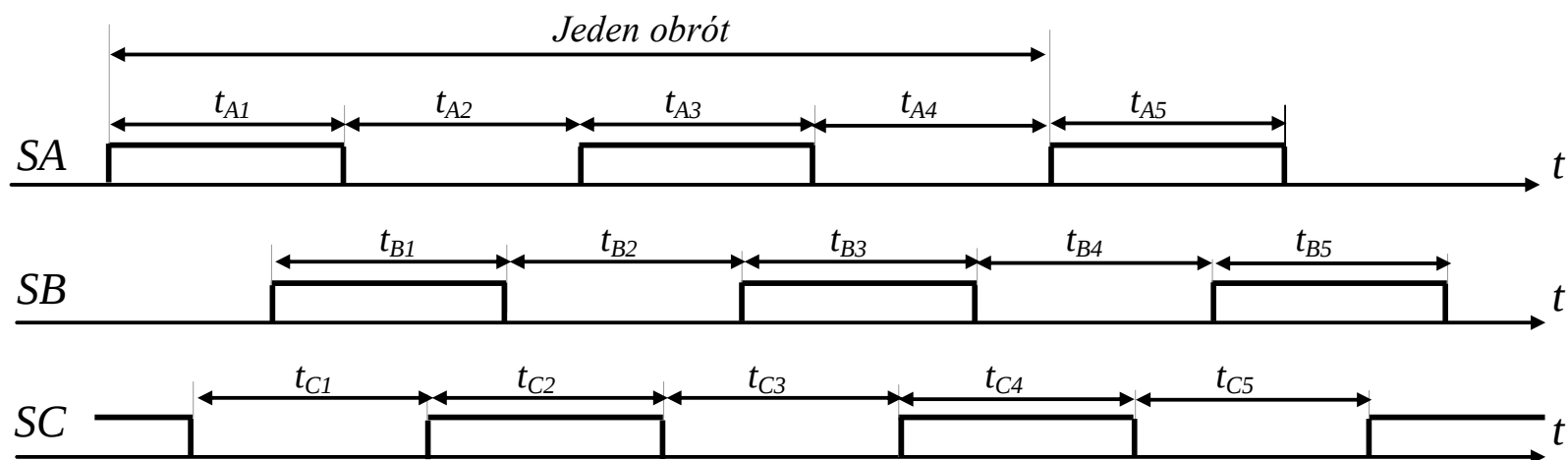
b)

Przebiegi impulsów bramkowych łączników (S1÷S6), impulsów czujnika położenia wirnika (SA, SB, SC) oraz przebiegi prądów faz silnika i prądu zastępczego dla pracy silnikowej i hamowania dla wirowania w prawo (a) i w lewo (b)



$$f_{nF} = \frac{1}{t_{F(n-1)} + t_{Fn}} = \frac{1}{T_{Fn}}$$

Zasada pomiaru prędkości wirowania bezszczotkowej maszyny jednobiegunowej



$$f_{nF} = \frac{1}{t_{F(n-3)} + t_{F(n-2)} + t_{F(n-1)} + t_{Fn}} = \frac{1}{T_{Fn}}$$

Zasada pomiaru prędkości wirowania bezszczotkowej maszyny dwubiegunowej