

Władysław PASZEK

Jerzy KUDŁA

Politechnika Śląska

Zakład Maszyn Elektrycznych

WŁASNOŚCI ASYNCHRONICZNEJ KASKADY PRZEKSZTAŁTNIKOWEJ
Z WYMUSZONĄ KOMUTACJĄ PRĄDU W WIRNIKU

Streszczenie. Dla maszyny indukcyjnej dwustronnie zasilanej przedstawiono metody nastawy prędkości obrotowej za pomocą napięcia dodatkowego w obwodzie wirnika. Wyprowadzono analityczne zależności opisujące własności asynchronicznej kaskady przekształtnikowej z wymuszoną komutacją prądu w wirniku.

1. Metody nastawy prędkości obrotowej w maszynie dwustronnie zasilanej za pomocą napięcia dodatkowego w obwodzie wirnika

Wprowadzenie do obwodu wirnika maszyny indukcyjnej dodatkowego napięcia o częstotliwości poślizgu oraz zmienianej amplitudzie i fazie umożliwia korzystne kształtowanie charakterystyk elektromechanicznych maszyny. W szczególności zaś pozwala na:

- nastawę w szerokich granicach prędkości obrotowej,
- zmianę w pewnym zakresie momentu krytycznego,
- częściową kompensację mocy biernej pobieranej przez maszynę z sieci.

Do szczególnie korzystnych cech wyróżniających ten sposób nastawy prędkości obrotowej maszyny w porównaniu z innymi układami zmieniającymi poślizg jest:

- częściowy zwrot mocy poślizgu od strony wirnika do sieci zasilającej przy pracy silnikowej maszyny w podsynchronizmie,
- wzrost mocy znamionowej maszyny przy pracy w nadsynchronizmie, przy jednoczesnym utrzymaniu stałości momentu przekazywanego przez wał maszyny do napędu,
- dobra sztywność mechanicznej charakterystyki zewnętrznej.

Realizację techniczną tego sposobu nastawy prędkości obrotowej maszyny indukcyjnej dokonywano pierwotnie poprzez stosowanie:

- dwustronnie zasilanych asynchronicznych maszyn komutatorowych,

- zespołów maszyn komutatorowych tworzących łącznie z maszyną indukcyjną tak zwane asynchroniczne kaskady elektromaszynowe (układ Krämera i Scherbiusa).

W układach tych funkcję przetwornicy częstotliwości napięcia dodatkowego do częstotliwości poślizgu spełniał: komutator w maszynach komutatorowych dwustronnie zasilanych, przetwornica jednotwornikowa w asynchronicznych kaskadach elektromaszynowych.

Występowanie w tych układach komutatora, będącego jedną z najbardziej wrażliwych części konstrukcyjnych maszyny (zagrożenie iskrzenia szczotek, konieczność konserwacji gładzi komutatora, okresowa wymiana szczotek), spowodował regres w stosowaniu tego rodzaju układów w przemyśle.

Szybki rozwój techniki tyrystorowej spowodował obecnie nawrót do tego sposobu nastawy prędkości obrotowej. Komutator występujący jako przetwornica częstotliwości w dwustronnie zasilanych maszynach komutatorowych łącznie ze źródłem wytwarzającym napięcie dodatkowe zastąpiono przez:

- bezpośredni przemiennik częstotliwości (cyklokonwertor) - rys. 1a,
- pośredni przemiennik częstotliwości z falownikiem napięciowym - rys. 1b.

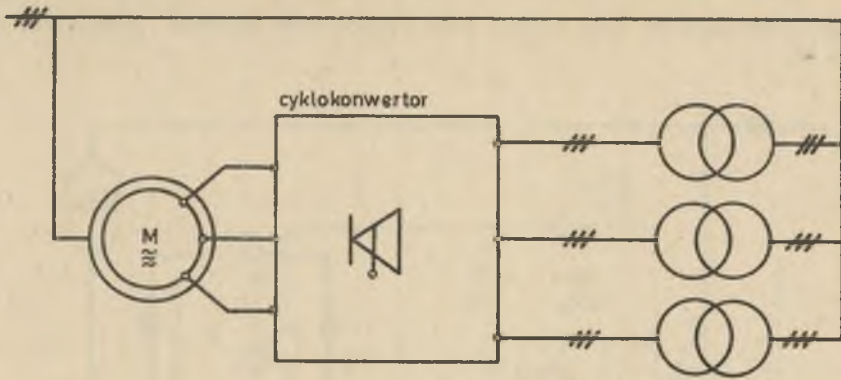
Alternatywnym rozwiązaniem tyrystorowego zasilania uzwojenia wirnika jest falownik prądowy (rys. 1c), w którym duża indukcyjność w obwodzie pośrednim prądu stałego, stanowiąca filtr wygładzający prąd w tym obwodzie, wymusza kształt prądu fazowego w uzwojeniach wirnika. Wprawdzie tyrystorowe przemienniki częstotliwości nie zapewniają sinusoidalności napięcia dodatkowego, wprowadzając do uzwojeń maszyny prócz harmonicznej podstawowej jeszcze harmoniczne wyższe lub niekiedy podharmoniczne, jednakże dominujący udział podstawowej harmonicznej determinuje własności silnika, zakłócone tylko efektami od pozostałych harmonicznych.

Przetwornicę jednotwornikową oraz pozostałe maszyny komutatorowe występujące w elektromaszynowych kaskadach Scherbiusa zastąpiono przez przekształtniki tyrystorowe Pt1 i Pt2 o naturalnej komutacji tyrystorów (układy te odpowiadają schematowi ideowemu z rys. 1c).

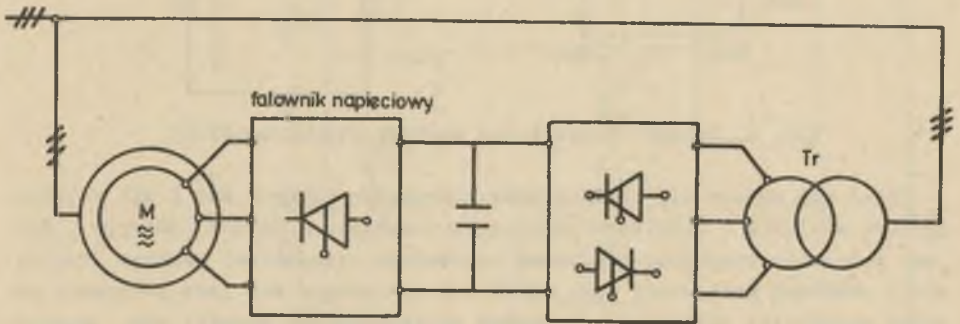
Przekształtnik Pt1 występuje jako:

- sześciopulsowy mostek diodowy,
- sześciopulsowy mostek tyrystorowy.

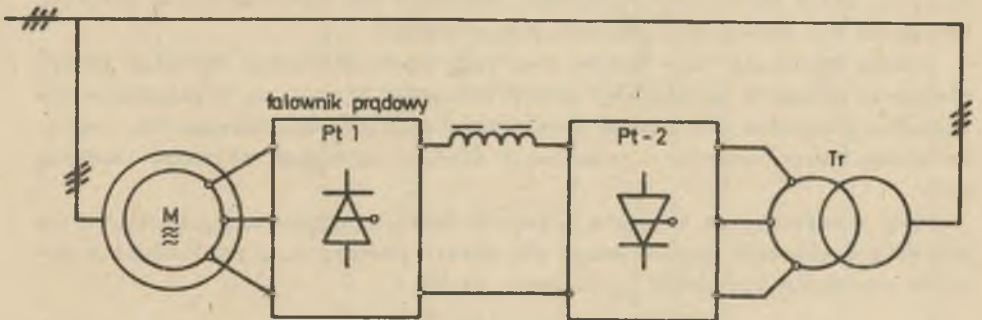
Natomiast przekształtnik Pt-2 stanowi sześciopulsowy mostek tyrystorowy sterowany symetrycznymi lub niesymetrycznymi impulsami zapłonowymi. Asynchroniczna kaskada zawierająca w obwodzie wirnika mostek diodowy ze względu na swą prostotę jest najczęściej stosowanym układem w przemyśle. Układ ten pozwala na nastawę prędkości obrotowej w zakresie $(0 \div 0,85 n_1)$ przy znamionowym momencie obciążenia i pracy silnikowej oraz umożliwia hamowanie generatorowe przy prędkościach nadsynchronicznych. Ze względu na możliwość tylko jednokierunkowego przepływu mocy z wirnika przez prostownik i inwertor do sieci, w kaskadzie tej nie można zmienić znaku momentu elektromagnetycznego przy prędkościach podsynchronicznych.



Rys. 1a. Schemat maszyny indukcyjnej dwustronnie zasilanej z cyklokonwer-
torem w obwodzie wirnika

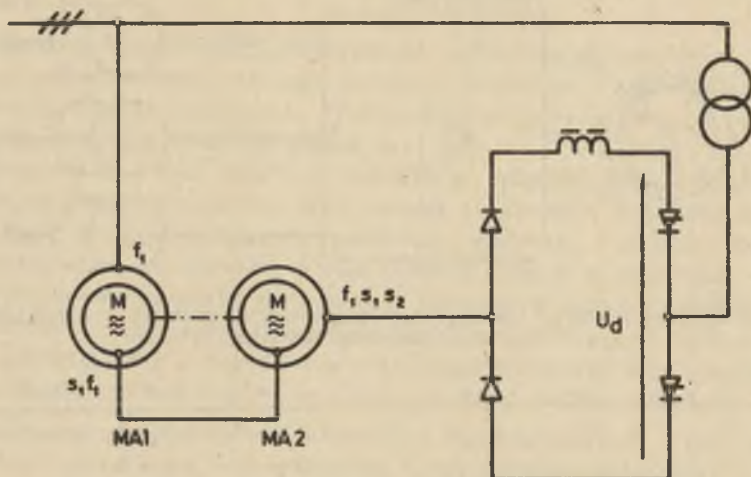


Rys. 1b. Schemat maszyny indukcyjnej dwustronnie zasilanej z falownikiem
napięciowym w obwodzie wirnika



Rys. 1c. Schemat maszyny indukcyjnej dwustronnie zasilanej z falownikiem
prądowym w obwodzie wirnika

Innym rozwiązaniem tego układu jest rozbudowana kaskada przedstawiona na rys. 2.



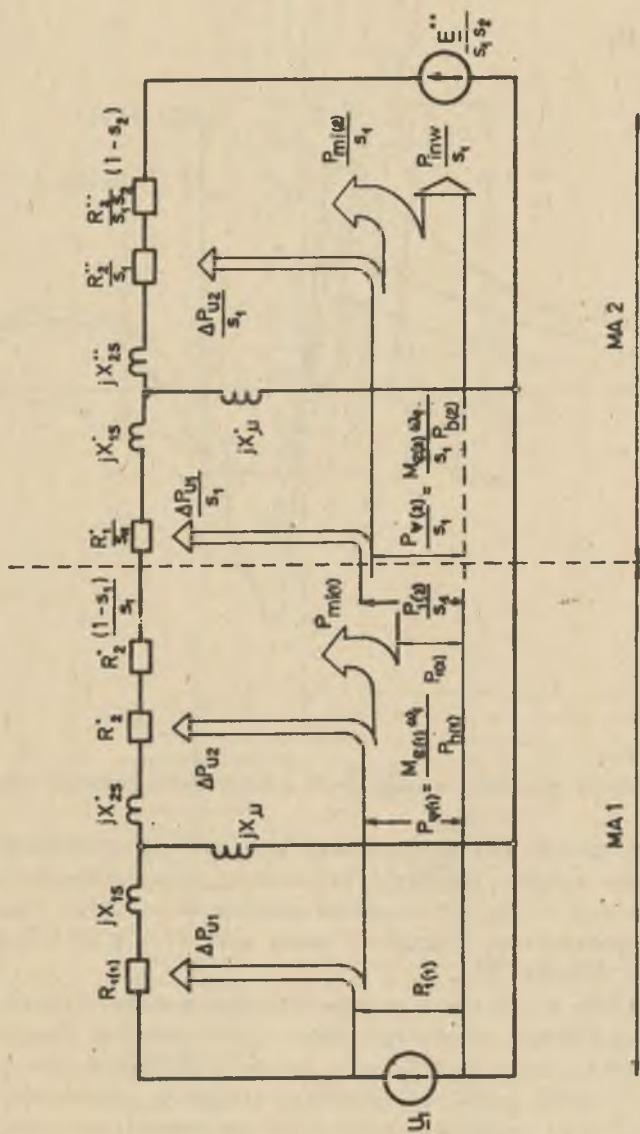
Rys. 2. Schemat bezstykowej kaskady asynchronicznej

Układ ten składa się z dwóch maszyn asynchronicznych MA1 i MA2 o trójfazowym stojanie i wirnikach połączonych kaskadowo: Wirnik maszyny MA1 jest połączony szeregowo z obwodem pierwotnym (wirnikiem) maszyny drugiej MA2 o zmienionej kolejności fazy. Obwód wtórny maszyny MA2 jest połączony poprzez prostownik diodowy do inwertora tyrystorowego. Wirniki obu maszyn sprzężone są ze sobą mechanicznie. Liczba par biegunów obu maszyn asynchronicznych p_{b1} , p_{b2} jest w ogólnym przypadku różna. Układ ten wyróżnia się jako układ bezstykowy, ponieważ uzwojenia obu wirników można połączyć szeregowo bez stosowania kontaktu szczotkowego.

Zasadę działania tego układu oraz jego własności można określić korzystając ze schematu zastępczego przedstawionego na rys. 3. W schemacie tym napięcie \underline{E}'' oznacza podstawową harmoniczną napięcia dodatkowego U_d , wprowadzonego przez inwertor i prostownik diodowy do obwodu wtórnego maszyny MA2.

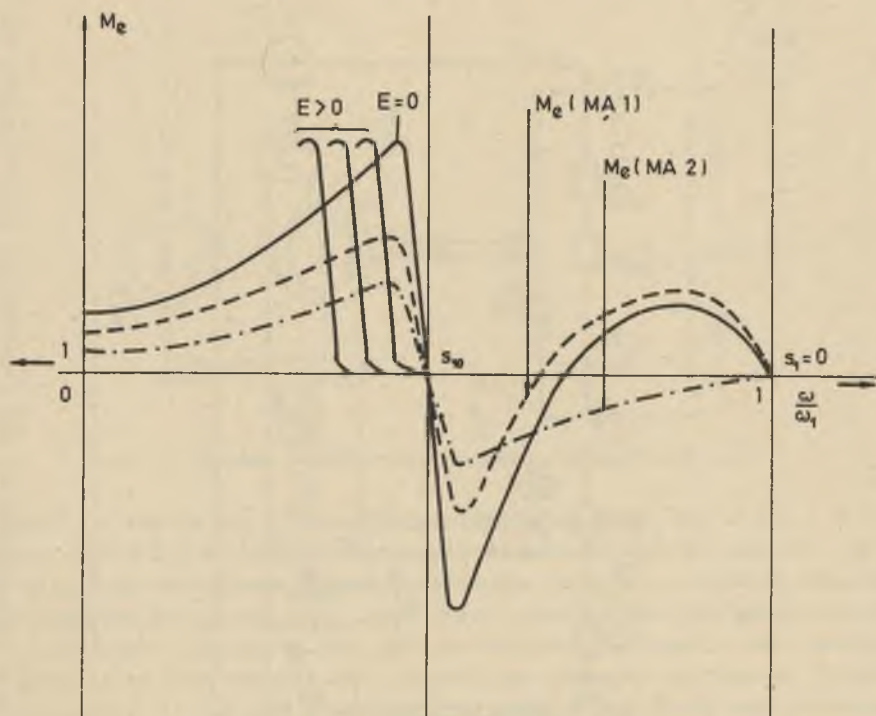
Przy założeniu, że napięcie \underline{E}'' jest w fazie z napięciem \underline{U}_1 oraz przy pominięciu reaktancji magnesowania obu maszyn poślizg s_{10} wynikający z warunku zerowania się prądu I_2 kaskady, wynosi:

$$s_{10} = \frac{p_{b2} + p_{b1} \frac{\underline{E}''}{\underline{U}_1}}{p_{b1} + p_{b2}}$$



Rys. 3. Schemat zastępczy bezstykowej kaskady asynchronicznej dla podstawowych harmonicznych napięć i prądów

Przedstawiony na schemacie zastępczym wykres Sankey'a rozplywu mocy i-
lustruje udział obu maszyn składowych kaskady w wytwarzaniu momentu elek-
tromagnetycznego.

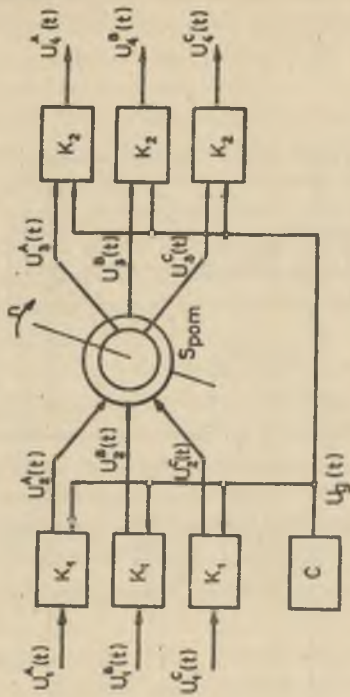
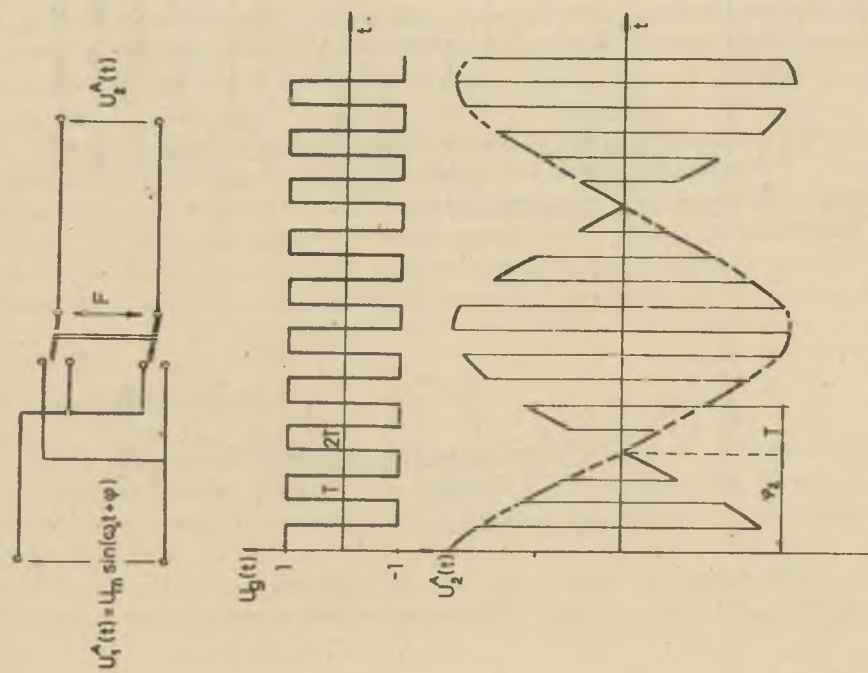


Rys. 4. Charakterystyki mechaniczne bezstykowej kaskady asynchronicznej

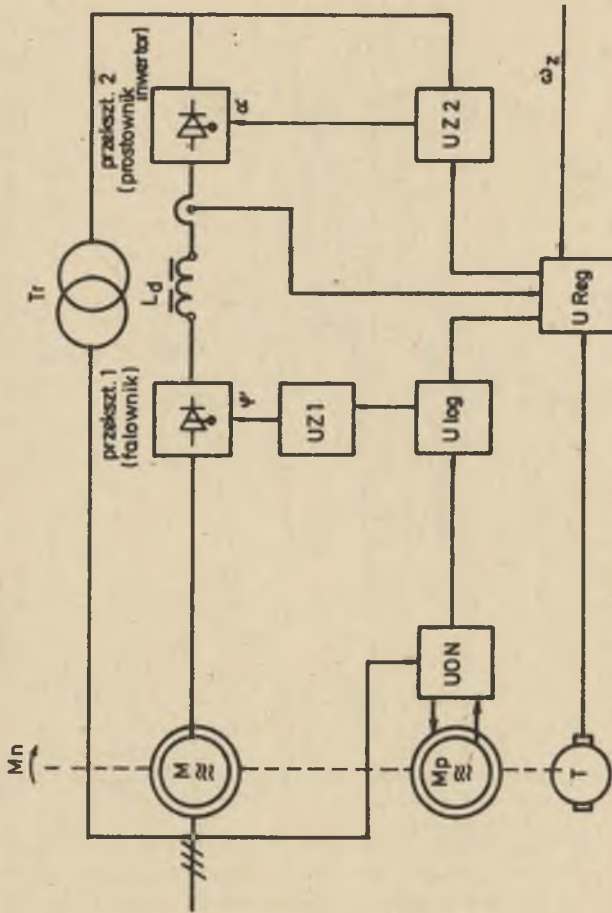
Charakterystyki mechaniczne tego typu kaskady przedstawiono na rys. 4. Rozszerzenie zakresu regulacji tej kaskady można dokonać w sposób skokowy poprzez zmianę liczby par biegunów maszyny MA1 i MA2. Omówiona kaskada znalazła zastosowanie w napędach dużej mocy (1 - 2 MW w wykonaniu firmy japońskiej Hitachi) [6].

Zastąpienie w kaskadach asynchronicznych mostka diodowego przez mostek tyrystorowy pozwala rozszerzyć zakres pracy maszyny. Kaskada taka umożliwia pracę silnikową i hamulcową w zakresie prędkości pod- i nadsynchronicznych. Z uwagi jednak na naturalną komutację tyrystorów praca układu z obciążeniem przy prędkościach bliskich synchronicznej jest niemożliwa.

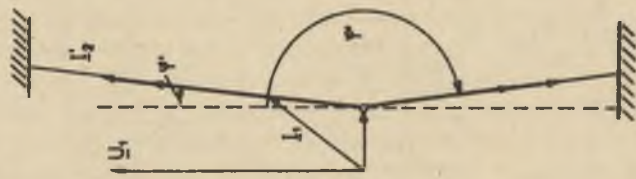
Zastosowanie do współpracy z wirnikiem silnika indukcyjnego przekształtnika prądu stałego na przemienny z wymuszoną komutacją tyrystorów pozwala rozszerzyć pracę maszyny na cały zakres prędkości obrotowej, umożliwiając jednocześnie zmniejszenie poboru mocy biernej przez maszynę z



Rys. 5. Schemat ideowy i zasada działania układu odwzorowania poślizgu



- UZ 1,2 - Układy zapobiegowe przebiegania przełącznika 1,2
- U log - Układ logiczny sterowania postępu wirnika
- UON - Układ odzwrotnienia postępu wirnika
- U Reg - Układ regulacji kaskady



Rys. 6. Schemat blokowy asynchronicznej kaskady przekształtnikowej z wymuszoną komutacją prądu w wirniku

aleci. Przekształtnik taki pracować może jako prostownik o komutacji wymuszonej w zakresie prędkości podsynchronicznych oraz jako falownik niezależny przy prędkościach nadsynchronicznych.

Układ sterowania przekształtnika synchronizowany za pomocą analogowo-cyfrowego układu odwzorowującego poślizg wirnika umożliwia nastawę dowolnego kąta wysterowania przekształtnika. Układ odwzorowuje kompleksor (wektor uogólniony) napięcia stojana na płaszczyźnie odniesienia związanej z wirnikiem. Umożliwia dzięki temu wybór takiego kąta zapłonu tyrystorów, przy którym otrzymuje się stałość kąta przesunięcia kompleksora podstawowej harmonicznej prądu wirnika względem kompleksora napięcia stojana na wspólnej płaszczyźnie odniesienia.

Przy pominięciu zjawisk komutacji w przekształtniku i założeniu idealnie wygładzonego prądu wyprostowanego jest to jednoznaczne z wymuszeniem stałego kąta przesunięcia fazowego φ' prostokątnego przebiegu czasowego prądu fazowego wirnika względem umownego przebiegu napięcia stojana U_1 , przedstawionego w układzie współrzędnych fazowych wirnika (napięcie stojana w układzie współrzędnych fazowych wirnika odpowiada rzutowi kompleksora napięcia stojana na osie faz wirnika).

Schemat ideowy układu odwzorowującego poślizg wirnika przedstawiono na rys. 5.

Podstawowym elementem tego układu jest transformator obrotowy, którego stojan i wirnik są na trwale złączone z silnikiem indukcyjnym. Napięcie zasilające stojan silnika zasila równocześnie, poprzez przesuwnik fazowy i układ przełączający, stojan trójfazowego transformatora obrotowego. Napięcie wyjściowe transformatora obrotowego poddane jest ponownemu przełączeniu, w rezultacie czego otrzymuje się na wyjściu układu napięcie o częstotliwości poślizgu i stałej amplitudzie niezależnej od prędkości obrotowej [5].

Asynchroniczne kaskady z komutacją wymuszoną są obecnie na etapie badań laboratoryjnych. Prace prowadzone w tym zakresie w Zakładzie Maszyn Elektrycznych Politechniki Śląskiej doprowadziły do realizacji technicznej modelu kaskady w oparciu o fragmentaryczne dane literaturowe [1]. Schemat blokowy zrealizowanej kaskady przedstawiono na rys. 6.

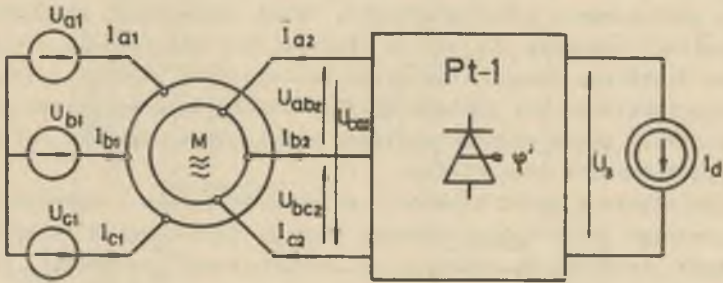
Przedstawiony układ jest przedmiotem analizy teoretycznej w pkt. 2.

2. Analiza teoretyczna

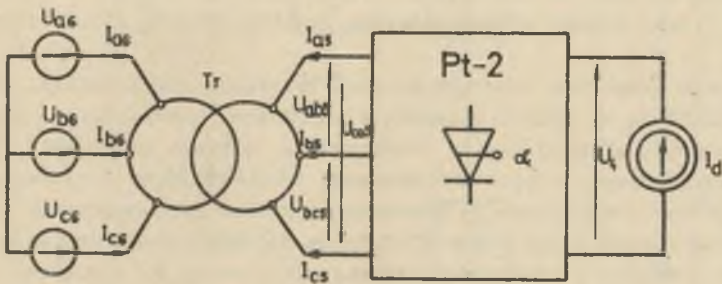
Celem analizy teoretycznej jest określenie własności elektromechanicznych asynchronicznej kaskady przekształtnikowej z wymuszoną komutacją prądu w obwodzie wirnika, w ustalonym elektromechanicznym i elektromagnetycznym stanie pracy.

Własności te można określić na podstawie modelu matematycznego kaskady. Stworzenie ogólnego modelu kaskady nie jest rzeczą łatwą z uwagi na

trudności w matematycznym opisie współpracujących ze sobą przekształtników tyrystorowych Pt-1 i Pt-2. Opis ten można znacznie uprościć zakładając, że prąd wyprostowany $i_d(t)$ ma wartość stałą $i_d(t) = I_d$, co jest równoznaczne z przyjęciem, że indukcyjność dławika wygładzającego $L_d \rightarrow \infty$.

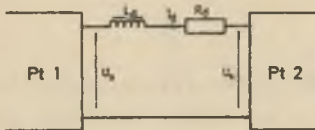


Rys. 7a. Schemat maszyny indukcyjnej współpracującej z przekształtnikiem Pt-1



Rys. 7b. Schemat transformatora współpracującego z przekształtnikiem Pt-2

Przyjęcie tego założenia pozwala na oddzielną analizę teoretyczną maszyny indukcyjnej współpracującej z przekształtnikiem Pt-1 i oddzielną analizę transformatora dopasowującego Tr, współpracującego z przekształtnikiem tyrystorowym Pt-2 (rys. 7a,b). Obydwa oddzielnie analizowane układy powiązane są ze sobą siecią prądu stałego (rys. 8).



Rys. 8. Sieć prądu stałego łącząca przekształtniki Pt 1 i Pt 2

Własności asynchronicznej kaskady określone są przez prądy płynące w uzwojeniach maszyny indukcyjnej i transformatora oraz przez prędkość kątową maszyny ω_m . Wielkości te można obliczyć analizując układy przedstawione na rys. 7a,b, zakładając jako wielkości wejściowe: napięcie zasilania $U_1(t)$, kąty występowania przekształtników tyrystorowych φ' , α oraz moment obciążenia M_m .

Znacznie jednak łatwiej jest przeprowadzić analizę układów, przyjmując jako wielkości zadane: napięcie zasilania $U_1(t)$, kąt wysterowania φ' , prędkość kątową ω_m oraz prąd I_d .

Ponieważ zagadnienie współpracy transformatora z przekształtnikiem tyrystorowym Pt-2 w stanie ustalonym, przy idealnie wygładzonym prądzie wyprostowanym jest znane i opisane w literaturze, stąd dalsze rozważania dotyczyć będą analizy współpracy maszyny indukcyjnej z przekształtnikiem tyrystorowym Pt-1.

Analizę tę przeprowadzi się przy następujących założeniach:

a) założenia dla maszyny indukcyjnej:

- nienasycony obwód magnetyczny,
- sinusoidalny rozkład uzwojeń stojana i wirnika,
- pominięcie strat mocy czynnej na przemagnesowanie żelaza stojana i wirnika;

b) założenia dla przekształtnika tyrystorowego Pt-1;

- tyrystory przekształtnika traktuje się jako elementy idealne w pełni sterowalne,
- pomija się wpływ na własności eksploatacyjne kaskady zjawisk komutacji w przekształtniku.

Przyjęte założenia w stosunku do maszyny indukcyjnej pozwalają opisać dowolny stan pracy maszyny przy pomocy układu równań różniczkowych 2.1.

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_1(t) \\ \underline{U}'_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 + \left(\frac{d}{dt} + j\omega\right) L_1 & \left(\frac{d}{dt} + j\omega\right) L_\mu \\ \dots & \dots \\ \frac{d}{dt} L_\mu & R'_2 + \frac{d}{dt} L'_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_1(t) \\ \underline{I}'_2(t) \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$M_{em} = P_b L_\mu \left\{ \operatorname{Re} \left(j \underline{I}'_2 \underline{I}_1^* \right) \right\}$$

$$\frac{j}{P_b} \frac{d\omega}{dt} = M_m(\omega) + M_{em}$$

Występujące w równaniach kompleksory wielkości uogólnionych napięć $\underline{U}_{1,2}(t)$ prądów $\underline{I}_{1,2}(t)$ ogólnie wielkości $\underline{W}_{1,2}(t)$ powiązane są z odpowiednimi wielkościami fazowymi $W_{k,1,2}(t)_{k=a,b,c}$ przy pomocy relacji:

- dla stojana:

$$\underline{W}_1(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} \left[W_{1a}(t) + \underline{a} W_{1b}(t) + \underline{a}^2 W_{1c}(t) \right] e^{-j\theta_{1a}}$$

$$W_{k1}(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} \operatorname{Re} \left\{ W_1(t) e^{j\psi_{1k}} \right\}$$

$$k = a, b, c$$

- dla wirnika:

$$\underline{W}'_2(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} [W'_{2a}(t) + a W'_{2b}(t) + a^2 W'_{2c}(t)]$$

$$W'_{k2}(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} \operatorname{Re} \left\{ \underline{W}'_2(t) e^{j\psi_{2k}} \right\}$$

$$k = a, b, c$$

gdzie:

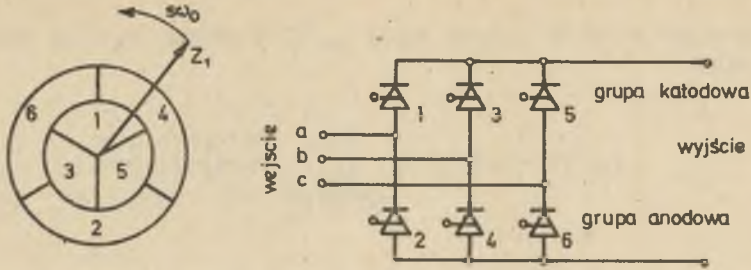
- R_1, R_2 - rezystancja uzwojenia stojana i sprowadzona na stronę uzwojenia stojana rezystancja uzwojenia wirnika,
- L_1, L_2 - indukcyjność całkowita uzwojeń stojana i sprowadzona na stronę uzwojenia stojana indukcyjność całkowita uzwojeń wirnika,
- $L\mu$ - indukcyjność magnesowania,
- $\omega = p_b \omega_m$ - elektryczna prędkość kątowa wirnika,
- ω_m - prędkość kątowa wirnika,
- p_b - liczba par biegunów,
- J - moment bezwładności,

$\psi_{1a} = \psi_{1a0} + \int \omega(t) dt$ - kąt elektryczny między osią uzwojenia fazy stojana a osią d. Oś d pokrywa się z osią uzwojenia wirnika a_2 i z osią liczb rzeczywistych płaszczyzny zespolonej,

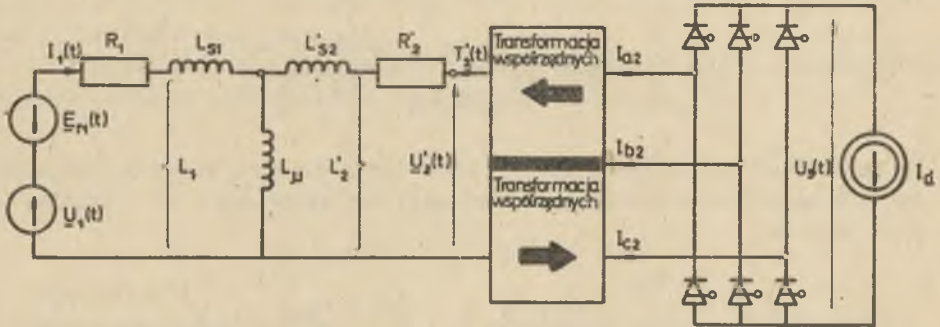
ψ_{1k}, ψ_{2k} - kąt elektryczny między osią d a osiami a, b, c stojana i wirnika.

Przyjęte założenia dla przekształtnika tyrystorowego Pt-1 pozwalają opisać jego pracę przy pomocy równań logicznych wynikających ze schematu łączy tyrystorów (rys. 9).

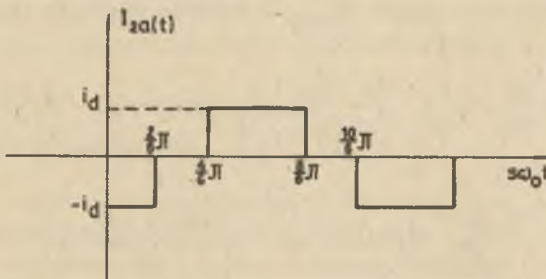
Na rysunku tym stany pracy tyrystorów (przewodzenie i nieprzewodzenie) określone są przez wirujący wektor Z, przy czym sektory koła o promieniu większym są przyporządkowane grupie anodowej, a sektory koła o promieniu mniejszym grupie katodowej. Uwzględniając układ równań różniczkowych maszyny można analizowany układ przedstawić w postaci schematu zastępczego (rys. 10).



Rys. 9. Schemat łączy tyrystorów przekształtnika Pt-1



Rys. 10. Schemat zastępczy maszyny indukcyjnej współpracującej z przekształtnikiem Pt-1



Rys. 11. Przebieg czasowy prądu w fazie a wirnika

Przy założonym idealnie wygładzonym prądzie $i_d(t) = I_d$ i pominięciu zjawisk komutacji w przekształtniku, prąd płynący w uzwojeniach wirnika maszyny indukcyjnej ma przebieg podany na rys. 11.

Rozkładając przebieg czasowy prądu $I_{2a}(t)$ w szereg Fouriera uzyskuje się zależność:

$$I'_{2a}(t) = -\frac{2\sqrt{3}}{\pi\psi} I_d \sum_{g=0\pm 1\pm 2}^{+\infty} \frac{\cos(6g+1)s\omega_0 t}{6g+1};$$

gdzie

$$\psi = \frac{z_1 k_{u1}}{z_2 k_{u2}} - \text{przekładnia napięciowa.}$$

Przebieg czasowy prądu w fazie b i c jest odpowiednio przesunięty o $\frac{1}{3}$ lub $\frac{2}{3}$ okresu. W konsekwencji uogólniony prąd wirnika ma postać:

$$I'_{-}(t) = -\frac{3\sqrt{2}}{\pi\psi} I_d \sum_{g=0\pm 1\pm 2}^{+\infty} \frac{j(6g+1)s\omega_0 t}{6g+1}.$$

Korzystając natomiast z układu równań różniczkowych maszyny indukcyjnej lub ze schematu zastępczego otrzymuje się wyrażenie na uogólniony prąd stojana:

$$I_1(t) = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{U_1 e^{js\omega_0 t}}{jX_1(1-jr_1)} + \frac{3\sqrt{2}}{\pi\psi} \frac{X_\mu}{X_1} I_d \sum_{g=0\pm 1\pm 2}^{+\infty} \frac{(6gs+1) e^{j(6g+1)s\omega_0 t}}{(6gs+1-jr_1)(6g+1)}.$$

Znając uogólniony prąd stojana i wirnika można obliczyć zależności na moment elektromagnetyczny średni $M_{em\ \acute{s}r}$ i średnie napięcie wyprostowane $U_{3\ \acute{s}r}$

$$M_{em\ \acute{s}r} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi\psi} \cdot \frac{p_b}{\omega_0} \cdot \frac{X_\mu}{X_1} \left[\frac{U_{1m} I_d}{\sqrt{1+r_1^2}} \cos(\psi + \varphi) - \frac{2\sqrt{3}}{\pi\psi} X_\mu I_d^2 \cdot \sum_{g=0\pm 1\pm 2}^{+\infty} \frac{1}{(6g+1)^2} \cdot \frac{(6gs+1)r_1}{r_1^2 + (6gs+1)^2} \right]$$

$$U_{3\ \acute{s}r} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} s U_{2om} \cos(\psi - \varphi) - \frac{1.8}{\pi^2} \frac{R_2'}{\psi^2} I_d \sum_{g=0\pm 1\pm 2}^{+\infty} \frac{1}{(6g+1)^2} \cdot$$

$$\frac{r_1^2 + (6gs+1)^2 + s(6gs+1)(6g+1) \frac{r_1}{r_2} (1-g)}{r_1^2 + (6gs+1)^2}$$

gdzie:

$$X_{\mu} = \omega_0 L_{\mu}; \quad X_1 = \omega_0 L_1; \quad X_2 = \omega_0 L_2$$

$$r_1 = \frac{R_1}{X_1}; \quad r_2 = \frac{R_2'}{X_2}; \quad \theta = 1 - \frac{X_{\mu}^2}{X_1 X_2'}$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{R_1}{X_1}; \quad \omega_0 - \text{pulsacja napięcia sieci zasilającej}$$

U_{20m} - napięcie fazowe wirnika przy poślizgu $s = 1$ i rozwartym uzwojeniu wirnika.

Otrzymano w ten sposób wszystkie wielkości charakteryzujące pracę maszyny, przy zadanym: napięciu zasilania, prądzie I_d , kącie wysterowania φ' i prędkości ω_m .

Odpowiadający temu stanowi pracy maszyny indukcyjnej kąt wysterowania przekształtnika tyrystorowego Pt-2 α wynika z zależności:

$$U_{3sr} = U_{4sr} + \Delta U_k,$$

$$U_{4sr} = - \frac{3\sqrt{3}}{\pi} U_5 \cos \alpha,$$

gdzie:

U_5 - napięcie fazowe strony wtórnej transformatora,

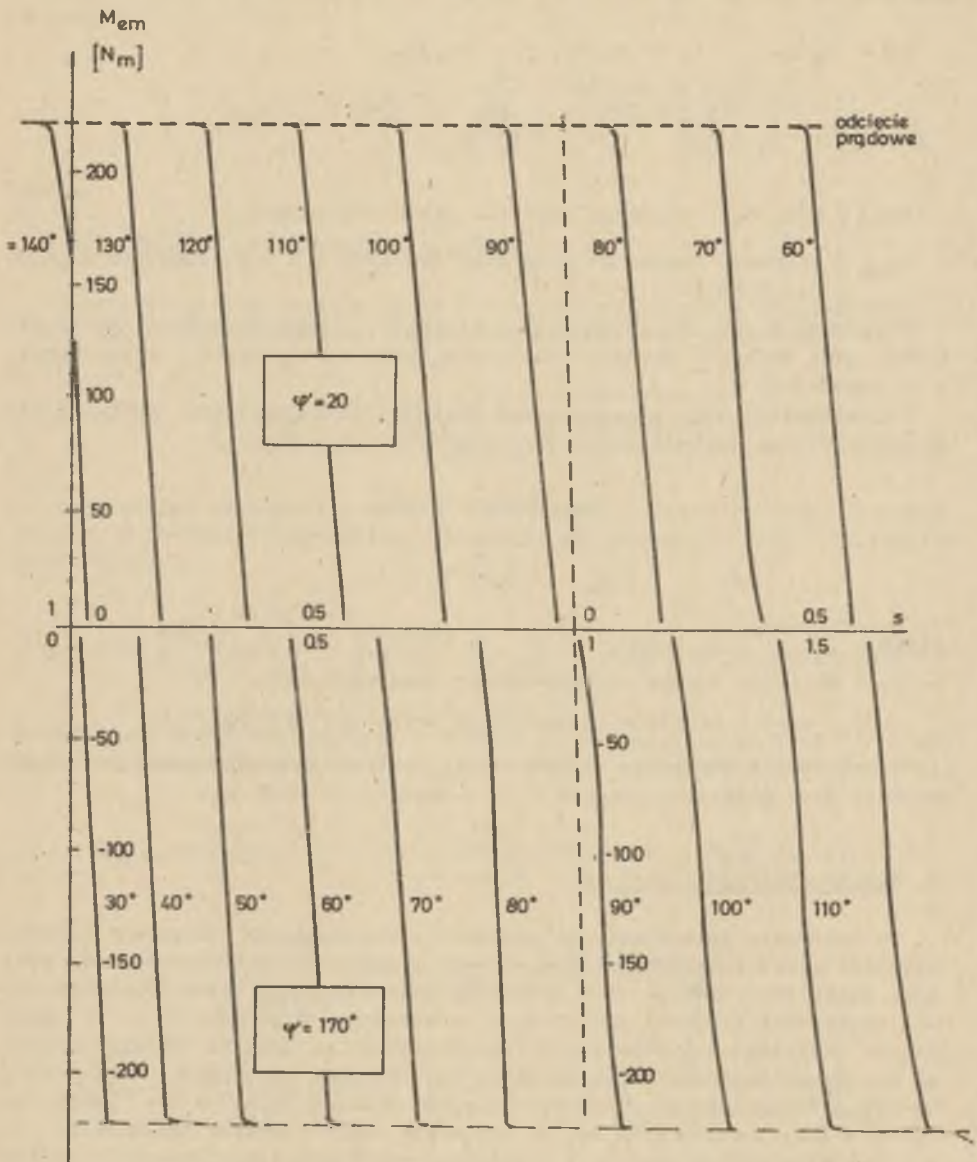
ΔU_k - spadek napięcia od komutacji w przekształtniku Pt-2.

W rezultacie otrzymuje się wszystkie wielkości charakteryzujące pracę kaskady przy założonym prądzie I_d i prędkości katowej ω_m .

3. Wyniki obliczeń i wnioski

Na podstawie przedstawionej metodyki przeprowadzono obliczenia charakterystyk elektromechanicznych modelowej kaskady asynchronicznej dla stałych kątów wysterowania φ' i parametrycznie zmiennych kątów wysterowania α . Obliczenia wykonano dla silnika indukcyjnego typu SZUe 76 b o mocy 22 kW. Obliczone charakterystyki przedstawiono na rys. 12. Charakterystyki elektromechaniczne uzyskane na drodze obliczeń porównano z charakterystykami pomiarowymi. Uzyskano najlepszą zgodność wyników dla pracy układu z dużym prądem wirnika, co odpowiada dużym momentom obciążenia.

Przy niewielkich momentach obciążenia występują dość znaczne różnice między charakterystykami pomierzonymi i obliczonymi. Spowodowane jest to przerywaniem prądu $i_d(t)$ płynącego w obwodzie wyprostowanym. Błędy charak-



Rys. 12. Obliczone charakterystyki mechaniczne kaskady dla silnika SZUe 76 b o mocy 22 kW

terystyk powoduje również założenie idealizujące o natychmiastowej komutacji wymuszonej prądu wirnika. Analiza i badania eksperymentalne wykazały, że:

- Asynchroniczna kaskada przekształtnikowa z wymuszoną komutacją tyrystorów w obwodzie wirnika umożliwia płynną nastawę prędkości obrotowej w całym zakresie prędkości pod i nadsynchronicznych dla pracy silnikowej i przy hamowaniu generatorowym.
- Istnienie zakresu pracy przerywanej przy małym prądzie wirnika utrudnia swobodne przejście układu z pracy silnikowej na pracę przy hamowaniu generatorowym. Podukład regulacji interweniujący przy zmianie znaku momentu elektromagnetycznego poprzez zmianę nastawy kąta φ' strefowo do -90° przed ostateczną zmianą tej nastawy o kąt 180° umożliwia utrzymanie nieprzerywanego prądu w dławiku wygładzającym.
- Zastosowanie odcięcia prądowego w obwodzie prądu stałego powoduje górne i dolne odcięcie prawie równoległej rodziny charakterystyk momentu elektromagnetycznego w całym zakresie prędkości obrotowej.
- Dla ograniczenia szczytowych napięć na tyrystorach przekształtników Pt1 i Pt2 konieczne jest stosowanie silników o możliwie małym napięciu wirnika. Dotyczy to w szczególności kaskady, w której wykorzystana ma być zdolność rewersji prędkości obrotowej silnika przy niezmienionym kierunku pola wirującego.
- Dla ograniczenia pojemności kondensatorów układu wymuszonego wyłączenia tyrystorów głównych przekształtnika Pt1 konieczne jest stosowanie tyrystorów o małym czasie odzyskiwania własności zaporowych i blokowania.
- Kaskady asynchroniczne umożliwiają korzystne powiększenie mocy znamionowej wyzyskanej z gabarytu maszyny przy pracy układu w nadsynchronizmie. Warunkiem koniecznym jest przystosowanie konstrukcji wirnika do powiększonej prędkości obrotowej. Ponieważ powiększeniu prędkości wirowania nie towarzyszy zwiększenie częstotliwości przemagnesowywania blach stojana i wirnika powyżej 50 Hz, uzyskać można mniejszą wartość strat mocy czynnej na przemagnesowywanie niż w przypadku silnika indukcyjnego z wirnikiem klatkowym zasilanym z falownika prądowego na częstotliwość 100 Hz.

LITERATURA

- [1] Ohno E., Akamatsu M.: Speed control of induction motors using self - controlled thyristor inverters IFAC - Warszawa 1969.
- [2] Koczara W.: Układ kaskady zaworowej z silnikiem asynchronicznym, Przegląd Elektrotechniczny 3/72.
- [3] Bisztyga K.: Kaskada i układy asynchroniczne z tyrystorami. Przegląd Elektrotechniczny 5/68.

- [4] Paszek W., Kudła J.: Tyristorowa kaskada asynchroniczna w nowoczesnym napędzie elektrycznym o dużym zakresie regulacji prędkości obrotowej. Prace VII Krajowej Konferencji Automatyki. Rzeszów 1977 t.II.
- [5] Krupa M., Stoiński K., Paszek W.: Układ odwzorowania wewnętrznego napięcia wirnika silnika asynchronicznego. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej Elektryka nr 38, 1972.
- [6] Noda J., Hiro Y., Hori T.: Brushless Scherbius Control for Induction Motors. Hitachi Review vol 23, no 8, 1974.

СВОЙСТВА АСИНХРОННОГО ТИРИСТОРНОГО КАСКАДА
С ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ КОММУТАЦИЕЙ ТОКА РОТОРА

Р е з ю м е

Представлены методы изменения скорости вращения асинхронной машины двухстороннего питания с помощью **введения** добавочной э.д.с. во вторичную цепь. Выведены аналитические зависимости описывающие свойства асинхронного тиристорного каскада с принудительной коммутацией тока ротора.

PROPERTIES OF AN ASYNCHRONOUS CONVERTER CASCADE WITH
A FORCED COMMUTATION OF THE ROTOR CURRENT

S u m m a r y

Methods of rotational speed control in a double fed asynchronous motor are presented. Analytical relations describing properties of the asynchronous cascade with a forced commutation of the rotor current are discussed.