

nymi synchronicznymi. Drugą bardzo ważną ich zaletą jest możliwość stosowania wirnika kubkowego o bardzo małym momencie bezwładności.

Wzory (11.36) i (11.37) wykazują prostoliniową zależność napięcia wyjściowego od prędkości. Ta prostoliniowość jest jednak wynikiem wielu uproszczeń, przyjętych przy wyprowadzaniu wzorów. Prostoliniową zależność napięcia wyjściowego od prędkości można by uzyskać tylko wtedy, gdyby rezystancja uzwojenia wzbudającego i reaktancja wirnika były równe zero, co jest oczywiście nieosiągalne. Błędy wynikające z tej nieliniowości można zmniejszyć przez zmniejszenie względnej prędkości wirnika względem prędkości synchronicznej, czyli przy danej prędkości wirnika przez zwiększenie częstotliwości napięcia wzbudzenia.

Wyznaczona na podstawie wzoru (11.37) transmitancja operatorowa prądnicy tachometrycznej indukcyjnej dwufazowej ma postać

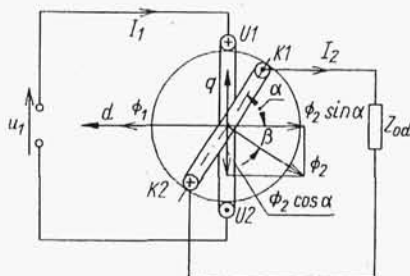
$$G(s) = \frac{\Delta U_{qs}(s)}{\Delta \Omega(s)} = c \quad (11.38)$$

a więc jest transmitancją operatorową członu bezinercyjnego.

11.4. PRZETWORNIKI POŁOŻENIA

11.4.1. Transformatory położenia kąowego

Transformator położenia kąowego jest urządzeniem, w którym napięcie wyjściowe (odpowiedź) jest pewną funkcją kąta obrotu wirnika (sygnału). W zależności od rodzaju tej funkcji może być transformator położenia kąowego sinusowy, kosinusowy, sinusowo-kosinusowy, liniowy itp. Transformator położenia kąowego jest odmianą maszyny indukcyjnej. Rdzenie magnetyczne stojana i wirnika są zbudowane z blach elektrotechnicznych. Uzwojenia stojana i wirnika są uzwojeniami jedno- lub dwufazowymi rozłożonymi, umieszczonymi w żłóbkach. W schemacie najprostszego transformatora położenia kąowego (rys. 11.19) uzwojenie stojana przedsta-



Rys. 11.19. Schemat transformatora położenia kąowego

wione jest przez cewkę $U1-U2$, a uzwojenie wirnika przez cewkę $K1-K2$. Uzwojenie stojana jest zasilane napięciem u_1 , a do uzwojenia wtórnego jest dołączony odbiornik o impedancji Z_{od} . Napięcie zasilające jest sinusoidalne

$$u_1 = U_{1m} \sin \omega t$$

Napięcie to wywołuje prąd i_1 oraz strumień Φ_1 . Ze zmianą kąta $\alpha = \frac{\pi}{2} - \beta$ (β – kąt między osiami uzwojeń stojana i wirnika) zmienia się indukcyjność L_{rs} , tzn. indukcyjność wzajemna uzwojeń stojana i wirnika. W przybliżeniu można przyjąć, że

$$L_{rs} = L_{rs0} \sin \alpha \quad (11.39)$$

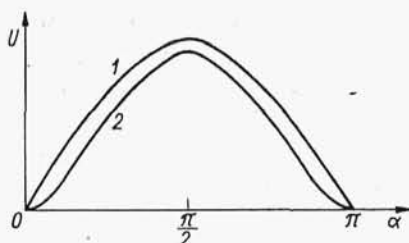
przy czym L_{rs0} – indukcyjność wzajemna uzwojenia stojana i wirnika przy $\alpha = \pi/2$. Wtedy napięcie indukowane w uzwojeniu wirnika

$$U_{i2} = U_{i20} \sin \alpha \quad (11.40)$$

gdzie U_{i20} – napięcie indukowane w uzwojeniu wirnika przy $\alpha = \pi/2$.

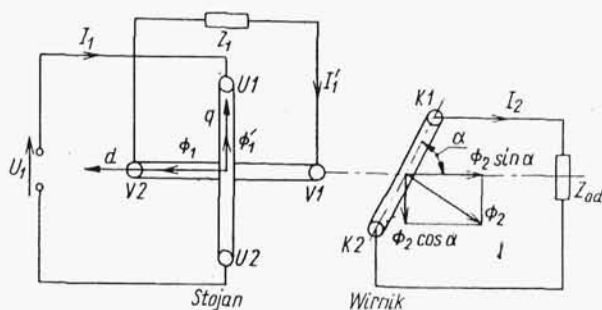
W ten sposób otrzymuje się *sinusowy transformator położenia kąowego*.

W stanie jałowym ($I_2 = 0$) napięcie wyjściowe U_2 jest równe napięciu indukowanemu U_{i2} , a więc zgodnie ze wzorem (11.40) jest to napięcie, które w funkcji kąta α zmienia się sinusoidalnie. Po dołączeniu odbiornika o impedancji Z_{od} płynie prąd I_2 , wywołujący strumień Φ_2 , który rozkłada się na strumień $\Phi_2 \sin \alpha$ i na strumień $\Phi_2 \cos \alpha$. Wtedy w osi podłużnej d są dwa strumienie: strumień stojana Φ_1 i strumień wirnika $\Phi_2 \sin \alpha$. Strumienie te kompensują się i pozostaje wypadkowy strumień magnesujący, wywołujący napięcie określone wzorem (11.40). W osi poprzecznej q istnieje strumień $\Phi_2 \cos \alpha$, który – indukując w uzwojeniu wirnika napięcie – powoduje, że napięcie wyjściowe ma przebieg zniekształcony (rys. 11.20).



Rys. 11.20. Przebieg sinusoidalny (1) i przebieg napięcia wyjściowego (2) w sinusowym transformatorze położenia kąowego z nieskompensowanym strumieniem poprzecznym

W transformatorze położenia kąowego z kompensacją w stojanie (rys. 11.21) do uzwojenia $V1-V2$, ustawionego w stojanie poprzecznie względem zasilanego uzwojenia $U1-U2$, jest dołączona impedancja Z_1 . Prąd I'_1 wywołuje strumień Φ'_1 , kompensujący poprzeczny strumień wirnika $\Phi_2 \cos \alpha$. Skompensowanie strumienia $\Phi_2 \cos \alpha$ oznacza zniesienie przyczyny deformującej sinusoidalność przebiegu napięcia wyjściowego w funkcji kąta α . Ten sposób kompensacji szkodliwego strumienia poprzecznego nazywa się także *symetryzacją pierwotną*. Wirnik z uzwojeniem jednofazowym jest magnetycznie niesymetryczny. Dlatego prąd w uzwojeniu stojana zależy od położenia wirnika, co jest przyczyną powstawania błędów. Analogicznie można umieścić także w wirniku odpowiednio obciążone uzwojenie prostopadłe do uzwojenia $K1-K2$, uzyskując symetrię wirnika i symetryzację pierwotną i wtórną. Taka symetryzacja zapewnia prawie dokładny sinusoidalny i kosinusoidal-



Rys. 11.21. Schemat transformatora położenia kąтового z kompensacją w stanie

ny przebieg napięć w uzwojeniach wirnika w funkcji kąta obrotu α . Przy odpowiednim połączeniu uzwojeń wtórnych i doborze impedancji obciążających można uzyskać praktycznie prostoliniową zależność napięcia wyjściowego w funkcji kąta obrotu dla stosunkowo szerokiego zakresu wartości tego kąta.

11.4.2. Selsyny

Selsyny są to elektryczne maszyny indukcyjne, które w odpowiednich układach przekazują na odległość przemieszczenia kątowe wałów. Układy selsynów nazywa się *łączami selsynowymi*.

Istnieje wiele rodzajów łącz, jak np.:

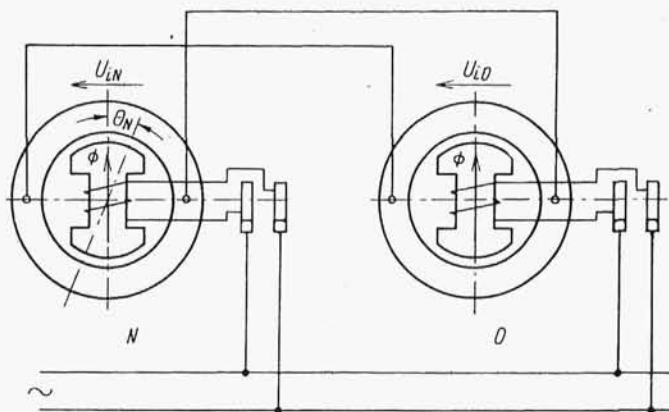
- selsynowe łącza wskaźnikowe;
- selsynowe łącza różnicowe;
- selsynowe łącza transformatorowe.

Podobnie istnieją różnego rodzaju elementy tych łącz, tzn. różnego rodzaju selsyny, jak np.:

- selsyn z jednofazowym uzwojeniem wzbudzenia na jednobiegunowym wirniku i z jednofazowym uzwojeniem synchronizacji w stojanie;
- selsyn z jednofazowym uzwojeniem wzbudzenia w stojanie i z trójfazowym uzwojeniem synchronizacji na wirniku;
- selsyn różnicowy z trójfazowym uzwojeniem na wirniku i trójfazowym uzwojeniem w stojanie.

Oprócz tego jest wiele innych, podobnych maszyn, jak np. selsyny bezstykowe, magnesyny itp.

Na rysunku 11.22 przedstawiono schemat *selsynowego łącza wskaźnikowego*, z selsynami z jednofazowym uzwojeniem synchronizacji w stojanie. Uzwojenie stojana jest jednofazowym uzwojeniem rozłożonym, umieszczonym w żłobkach. Wirnik ma bieguny wydadne i uzwojenie skupione (w formie cewki). Uzwojenia wirników selsyna nadawczego (nadajnika – N) i selsyna odbiorczego (odbiornika – O) są uzwojeniami wzbudzenia i są zasilane z jednego źródła napięcia przemiennego. Uzwojenia stojanów są uzwojeniami synchronizacji i są połączone „przeciw sobie”.



Rys. 11.22. Schemat łącza selsynowego wskaźnikowego z selsynami z jednofazowym uzwojeniem synchronizacji w stojanie

Przy jednakowych położeniach wirników względem stojanów obydwóch selsynów (kąt $\theta_N = \theta_O$) strumienie magnetyczne skojarzone z uzwojeniami stojanów od strumieni wzbudzenia Φ są sobie równe i napięcia indukowane w uzwojeniach stojanów są sobie równe, czyli

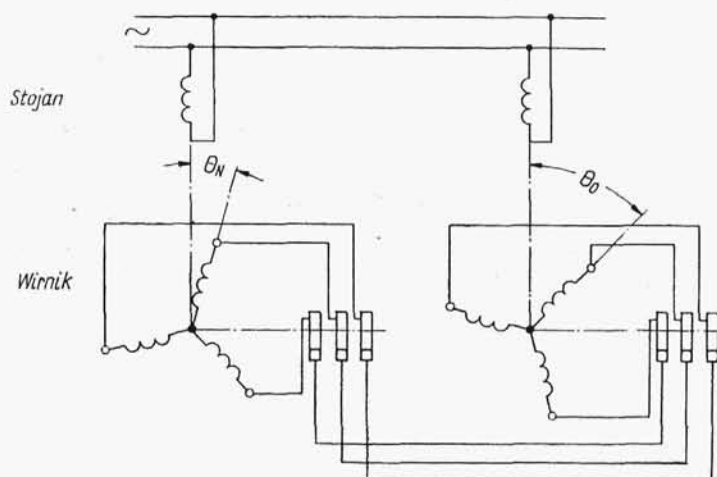
$$U_{iN} = U_{iO}$$

Wtedy w połączonych uzwojeniach stojanów nie płyną prądy. Jeśli wirnik selsyna nadawczego N obróci się o kąt θ_N , a selsyn odbiorczy ma dalej położenie zerowe przy $\theta_O = 0$, to strumienie magnetyczne skojarzone nadajnika N są proporcjonalne do $\Phi \cos \theta_N$, a strumienie magnetyczne skojarzone odbiornika O są proporcjonalne do Φ . Wtedy $U_{iN} < U_{iO}$, co powoduje przepływ prądów przez uzwojenia stojanów selsynów. Na skutek tego powstają momenty obrotowe, ściągające wirniki selsynów do jednakowych położen. Położenie wirnika nadajnika jest wymuszone przez impuls nadawczy, więc wirnik odbiornika obróci się o kąt $\theta_O = \theta_N$. Kąt θ_N został więc bez mechanicznego sprzężenia przeniesiony na odległość.

W układzie z rys. 11.22 przez szczotki selsynów stale płynie prąd, co jest zasadniczą wadą tego układu. Wady takiej pozbawione jest selsynowe łącze wskaźnikowe z selsynami z jednofazowymi uzwojeniami wzbudzenia w stojanach i trójfazowymi uzwojeniami synchronizacji na wirnikach, jak na rys. 11.23. Przy jednakowych położeniach obydwóch wirników, czyli przy $\theta_N = \theta_O$, prądy w odpowiednio ze sobą połączonych trójfazowych uzwojeniach wirników nie płyną. Przy $\theta_N \neq \theta_O$ napięcia indukowane w odpowiednich uzwojeniach fazowych wirników tych selsynów są różne, w uzwojeniach wirników płyną prądy i powstaje moment synchronizujący

$$M_s = M_{sm} \sin \theta \quad (11.41)$$

przy czym: M_{sm} – amplituda momentu synchronizującego; $\theta = \theta_N - \theta_O$ – kąt niezgodności łącza.



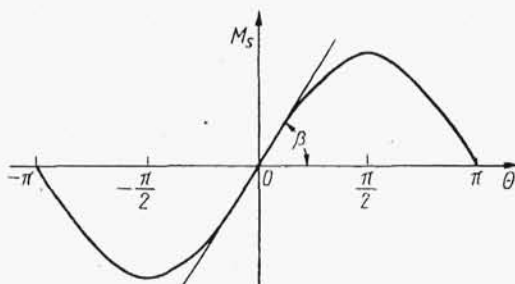
Rys. 11.23. Schemat łącza selsynowego wskaźnikowego z selsynami z jednofazowymi uzwojeniami w stojanach i trójfazowymi uzwojeniami synchronizacji w wirnikach

Kąt θ_w jest wymuszony przez impuls nadawczy, więc wirnik selsyna odbiorczego obróci się o kąt θ_o równy kątowi θ_N .

Wzór (11.41) określa również moment w selsynie odbiorczym O przy nieruchomym jego wirniku. Zależność określona wzorem (11.41) nazywa się *charakterystyką statyczną selsynowego łącza wskaźnikowego* i jest pokazana na rys. 11.24. Przy $-\frac{\pi}{2} < \theta < \frac{\pi}{2}$ jest położenie stabilne, przy $-\pi < \theta < -\frac{\pi}{2}$ albo $\frac{\pi}{2} < \theta < \pi$ jest położenie niestabilne. Przy $\theta = 0$ jest położenie zerowe stabilne. Przy $\theta = \pi$ jest położenie zerowe niestabilne. *Szttywnością selsynowego łącza wskaźnikowego* nazywa się

$$m_0 = \operatorname{tg} \beta = \left. \frac{dM_s}{d\theta} \right|_{\theta=0} \quad (11.42)$$

Można wyprowadzić wzór na moment synchronizujący przy wirniku obracającym się, czyli na charakterystykę dynamiczną M_d selsynowego łącza wskaź-



Rys. 11.24. Charakterystyka statyczna łącza selsynowego wskaźnikowego

nikowego. To wyrażenie ma postać inną, niż wzór (11.41). Często jednak przyjmuje się $M_d = M_s$, a błąd popełniony w ten sposób nie przekracza 5%.

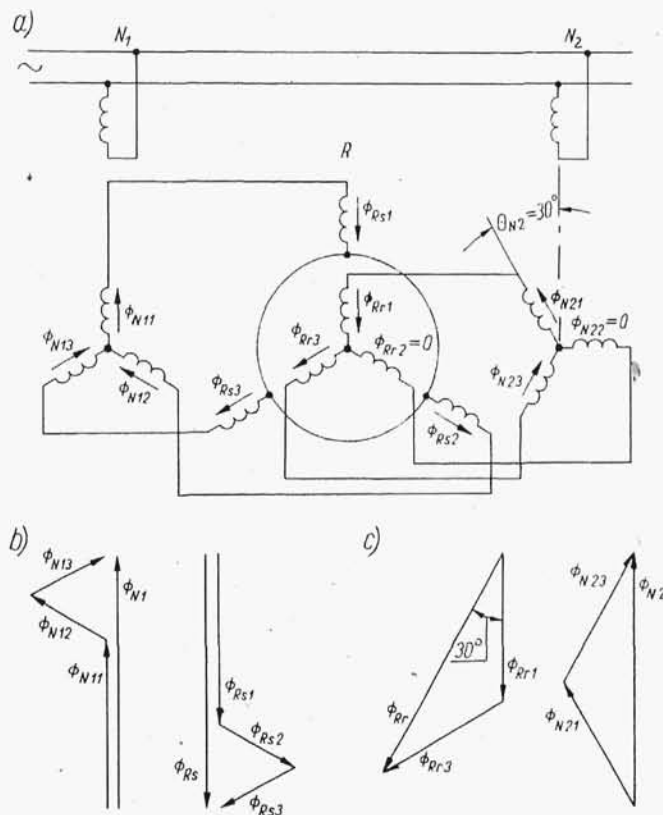
Na ogół żąda się, aby błąd wskazań selsynowego łącza wskaźnikowego był możliwie mały. Błąd ten zwiększa się, jeżeli:

- wzrasta tarcie w łożyskach selsyna odbiorczego;
- zwiększa się odległość między selsynami, ponieważ wtedy wzrasta impedancja przewodów łączących, maleje prąd i maleje moment synchronizujący;
- zwiększają się różnice między impedancjami poszczególnych przewodów łączących;
- wzrasta różnica napięć wzbudzenia, co może się zdarzyć przy dużej odległości między selsynami;
- pojawiają się wahania częstotliwości;
- pojawiają się niedokładności wykonawcze selsynów, np. niewyważenie wirnika, niejednorodna permeancja rdzenia w różnych kierunkach, niejednakowe liczby zwójów w poszczególnych uzwojeniach itp.

Uzyskanie selsynów o dostatecznie małych błędach wymaga bardzo dużej precyzji przy ich produkcji.

Łącze selsynowe różnicowe (rys. 11.25a) składa się z dwóch selsynów nadawczych N_1 i N_2 oraz z selsyna różnicowego R . Selsyn różnicowy jest zbudowany jak trójfazowa maszyna indukcyjna z identycznymi trójfazowymi uzwojeniami stojana i wirnika. Na rysunku 11.25b dane są wykresy strumieni selsyna nadawczego (fazowych Φ_{N11} , Φ_{N12} , Φ_{N13} i wypadkowego Φ_{N1}) oraz stojana selsyna różnicowego (fazowych Φ_{R51} , Φ_{R52} , Φ_{R53} oraz wypadkowego Φ_{R5}). Gdyby wirnik selsyna N_2 był w położeniu zerowym, wykres jego strumieni byłby identyczny z przedstawionym na rys. 11.25b wykresem strumieni selsyna N_1 , a wykres strumieni wirnika selsyna różnicowego byłby identyczny z wykresem strumieni stojana selsyna różnicowego. Strumienie stojana selsyna różnicowego Φ_{R5} i wirnika tego selsyna Φ_{Rr} pokryłyby się i w selsynie różnicowym nie wytworzyłby się moment obrotowy. W schemacie połączeń na rys. 11.25a wirnik selsyna nadawczego N_2 jest obrócony o $\pi/6$ w kierunku przeciwnym do kierunku ruchu wskazówek zegara. Na rysunku 11.25c przedstawiono wykres strumieni selsyna N_2 (fazowych Φ_{N21} , Φ_{N23} , $\Phi_{N22} = 0$ i wypadkowego Φ_{N2}) oraz strumieni wirnika selsyna różnicowego (fazowych Φ_{Rr1} , Φ_{Rr3} , $\Phi_{Rr2} = 0$ i wypadkowego Φ_{Rr}). Wypadkowy strumień wirnika selsyna różnicowego zachował swoją wartość, ale obrócił się o $\pi/6$ zgodnie z ruchem wskazówek zegara względem wypadkowego strumienia stojana Φ_{R5} . Dlatego w selsynie różnicowym powstaje moment obrotowy, powodujący obrót jego wirnika o kąt równy kątowi obrotu wirnika selsyna N_2 (w tym przypadku $\pi/6$) i w kierunku obrotu wirnika selsyna N_2 . Jeżeli jednocześnie następuje obrót wirnika selsyna N_1 o kąt Θ_{N1} i wirnika selsyna N_2 o kąt Θ_{N2} , to wirnik selsyna różnicowego obraca się o kąt

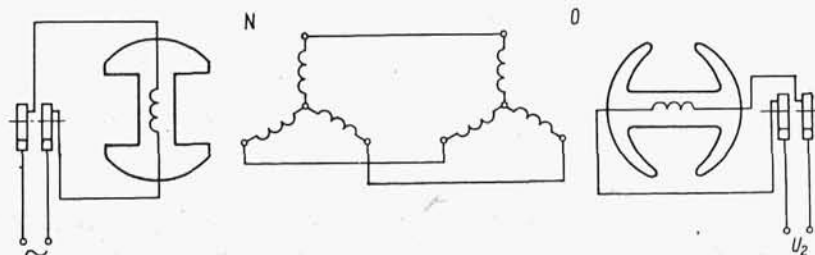
$$\Theta_{R1} = \Theta_{N1} \pm \Theta_{N2}$$



Rys. 11.25. Łącze selsynowe różnicowe: a) schemat połączeń; b) wykres strumieni selsyna nadawczego N_1 i stojana selsyna różnicowego; c) wykres strumienia selsyna nadawczego N_2 i wirnika selsyna różnicowego przy obrocie wirnika selsyna N_2 o $\pi/6$

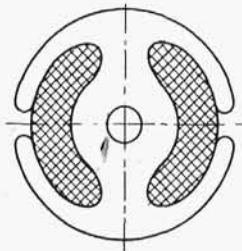
przy czym znak minus odpowiada zgodnym kierunkom kątów obrotów wirników N_1 i N_2 , a znak plus odpowiada różnym kierunkom obrotu. Tak więc selsyn różnicowy wskazuje sumę albo różnicę kątów selsynów nadawczych.

Łącze selsynowe transformatorowe (rys. 11.26) pozwala na uzyskanie wyjściowego napięcia na selsynie odbiorczym proporcjonalnego do pewnej funkcji kąta odchylenia wału selsyna nadawczego. Selsyn nadawczy N tego łącza jest wzbudzany



Rys. 11.26. Schemat łącza selsynowego transformatorowego

od strony wirnika. Rdzeń wirnika selsyna N ma kształt biegunów wydających, a uzwojenie wirnika jest uzwojeniem skupionym. Uzwojenie stojana jest trójfazowym uzwojeniem rozłożonym i jest połączone z analogicznym, trójfazowym, rozłożonym uzwojeniem stojana selsyna odbiorczego O . Wirnik odbiorczego selsyna łączy transformatorowego, czyli wirnik selsyna transformatorowego, ma charakterystyczną budowę widoczną na rys. 11.27, zapewniającą stałą wartość indukcji od uzwojenia



Rys. 11.27. Schemat konstrukcji wirnika selsyna transformatorowego

wirnika prawie na całym obwodzie selsyna. Taki układ selsynów jest podobny do układu dwóch transformatorów połączonych ze sobą kaskadowo. Pulsujący strumień od uzwojenia wzbudzenia selsyna nadawczego indukuje w uzwojeniach stojana napięcia

$$\left. \begin{aligned} U_{iN1} &= U_m \cos \alpha_N \\ U_{iN2} &= U_m \cos \left(\alpha_N - \frac{2\pi}{3} \right) \\ U_{iN3} &= U_m \cos \left(\alpha_N + \frac{2\pi}{3} \right) \end{aligned} \right\} \quad (11.43)$$

przy czym: α_N – kąt między osią wirnika i osią pierwszej fazy stojana selsyna nadawczego; U_m – napięcie indukowane w pierwszej fazie przy $\alpha_N = 0$.

Pod wpływem takich napięć płyną prądy, powodujące powstanie strumienia pulsującego w stojanie selsyna odbiorczego O , więc w uzwojeniach stojana selsyna odbiorczego indukują się napięcia U_{iO1} , U_{iO2} , U_{iO3} . Przy pominięciu spadków napięć $U_{iN1} = U_{iO1}$, $U_{iN2} = U_{iO2}$, $U_{iN3} = U_{iO3}$.

Strumień pulsujący w selsynie odbiorczym O ma taką samą wartość i taki sam kierunek jak w selsynie nadawczym N . Jeśli wirnik selsyna nadawczego zostanie obrócony o pewien kąt α_N , to strumień w selsynie odbiorczym obróci się o taki sam kąt. Napięcie U_{i2} indukowane w uzwojeniu wirnika selsyna odbiorczego można wyrazić wzorem

$$U_{i2} = U_{m2} \cos \alpha_N$$

w którym U_{m2} – wartość tego napięcia przy $\alpha_N = 0$.

Jeśli oznaczyć przez θ kąt między osią wirnika i osią poprzeczną do osi pierwszej fazy, to

$$U_{i2} = U_{m2} \sin \theta$$

co daje sinusoidalną zależność napięcia wyjściowego $U_2 \approx U_{i2}$ od kąta obrotu selsyna nadawczego. Selsynowe łączy transformatorowe pozwala na zdalny pomiar kąta obrotu wału.