

Krzysztof KRYKOWSKI

PEWNE ANALOGIE POMIĘDZY UKŁADAMI PROSTOWNICZYMIZI Z PĘTLĄ SYNCHRONIZACJIFAZOWEJ A UKŁADAMI PROSTOWNICZYMIZI STEROWANYMIZI PRZEZ POZIOMOWANIE
NAPIĘCIEM SYNCHRONIZUJĄCYM

Streszczenie. Formalnie przekształcając równania opisujące układ z pętlą synchronizacji fazowej i sprzężeniem zwrotnym od napięcia wyprostowanego uzyskano wyrażenia opisujące moment pojawiania się impulsów wyzwalających zawory, analogiczne do odpowiednich wyrażeń dla sterowania wykorzystującego poziomowanie napięcia sterującego napięciem synchronizującym w układzie z ujemnym napięciowym sprzężeniem zwrotnym. Napięcie wstępnegoysterowania dla układów z pętlą synchronizacji fazowej powinno być przy tym proporcjonalne do pochodnej napięcia synchronizującego w układach z poziomowaniem. Pozwoliło to wyciągnąć wniosek, że w określonych przypadkach układy z pętlą synchronizacji fazowej zapewniają takie same własności statyczne i dynamiczne prostownika, jak układy z poziomowaniem napięcia sterującego napięciem synchronizującym objęte ujemnym napięciowym sprzężeniem zwrotnym.

1. Wprowadzenie

W układach prostowniczych pracujących przy wysokim poziomie zakłóceń często stosuje się układy sterowania z tak zwaną pętlą synchronizacji fazowej PLL - phased locked loop [3], [4]. Panuje ogólna opinia, że układy te charakteryzują się niekorzystnymi własnościami dynamicznymi [3], brak jednak opracowań szczegółowo opisujących własności dynamiczne układów sterowania z PLL. W dalszych rozważaniach wykazano, że pewne własności dynamiczne takich układów są analogiczne do własności układów prostowniczych sterowanych przez poziomowanie napięcia sterującego napięciem synchronizującym.

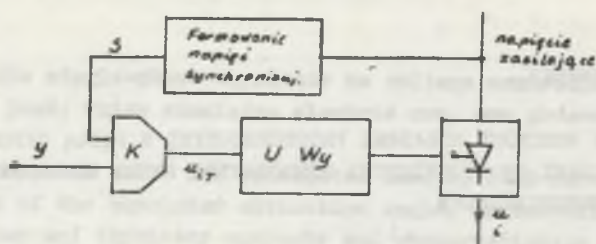
2. Sterowanie układu prostowniczego przez poziomowanie napięcia sterującego napięciem synchronizującym

Sterowanie układów prostowniczych przez poziomowanie napięcia sterującego napięciem synchronizującym jest podstawową metodą sterowania fazowego. Napięcia synchronizujące są okresowymi funkcjami czasu. Funkcje te spełniają warunek:

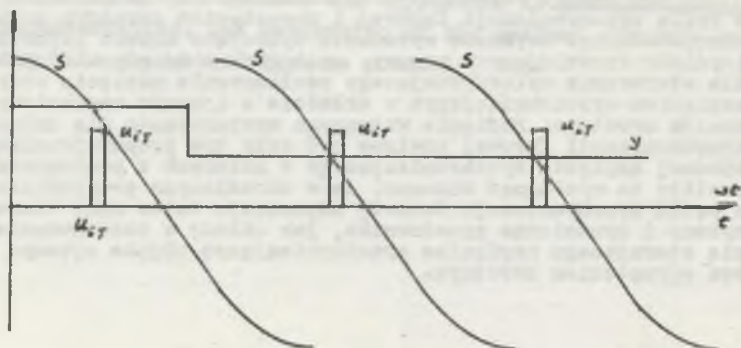
$$s_{n-1}(t-T_0) = s_n(t)$$

(1)

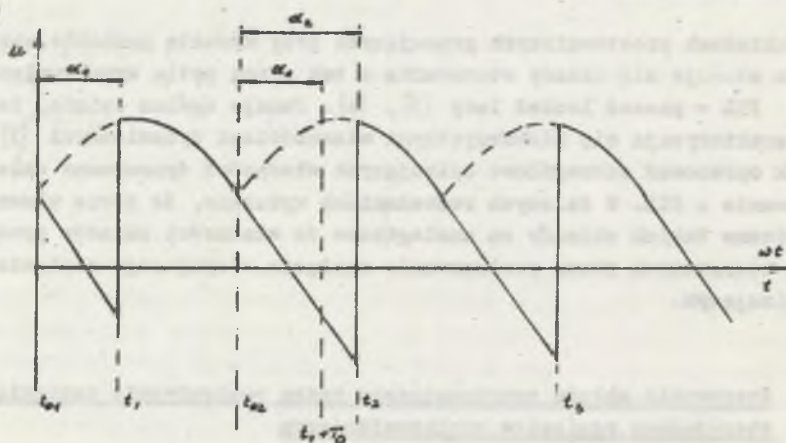
a)



b)



c)



Rys. 1. Sterowanie przez poziomowanie napięciem synchronizującym
 a - schemat blokowy, b - przebiegi czasowe wielkości w układzie sterującym, c - przebiegi napięcia wyjściowego

Fig. 1. Control with comparison of control voltage and reference voltage
 a - block diagram, b - time relation of controlled variables, c - output voltage waveform

Można je również potraktować jako $S(\omega t)$ funkcje bieżącego kąta elektrycznego lub jako $S(\alpha)$ funkcje kąta opóźnienia. Jako napięcie synchronizujących używa się najczęściej napięcie kosinusoidalnych lub liniowych. Zasadę sterowania przedstawiono na rys. 1a-c. Na rysunku a przedstawiono uproszczony schemat blokowy układu sterowania, na rysunkach b oraz c wyidealizowano przebiegi czasowe występujących w układzie wielkości. Rysunki wykonano dla kosinusoidalnego napięcia synchronizującego i 3-fazowego jednokierunkowego układu prostowniczego.

W komparatorze K następuje porównanie wartości chwilowych napięć sterującego y oraz synchronizującego S . W chwili gdy napięcia te zrównają się, na wyjściu komparatora pojawi się impuls taktujący u_{1T} . Impuls ten wysterowuje układ wyzwalania U Wy powodując załączenie odpowiedniego zaworu. Równocześnie następuje załączenie na wejście komparatora napięcia sterującego odpowiadającego wymaganiom następnego taktu pracy układu prostowniczego. Wynikły z warunków sterowania moment załączenia pierwszego analizowanego pulsu oznaczono przez t_1 . Przez t_2 oznaczono moment załączenia następnego pulsu będący równocześnie momentem zakończenia pierwszego analizowanego pulsu. Z kolei przez t_{01} oraz t_{02} oznaczono czas odpowiadający naturalnemu załączeniu analizowanych pierwszego i drugiego pulsu.

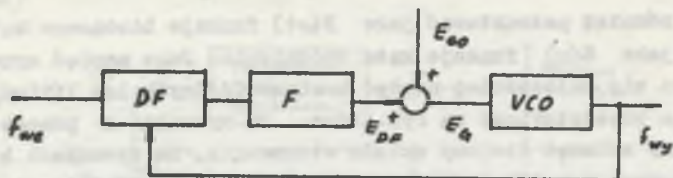
Omówienie układu sterowania przez poziomowanie należałoby jeszcze uzupełnić uwagą, że napięcie sterujące może być zadawane zarówno w układzie otwartym, jak i w układzie zamkniętym. W szczególnie częstym przypadku stosowania ujemnego napięciowego całkowitego sprzężenia zwrotnego napięcie sterujące można opisać zależnością:

$$y = \frac{k_k}{T_0} \int_{t_1}^t (w - u) dt + y(t_1). \quad (2)$$

W zależności (2) przez w oznaczono napięcie wiodące, przez u napięcie wyjściowe; przez T_0 średni czas trwania pulsu, a przez k_k dodatkowy współczynnik korekcji w torze sprzężenia zwrotnego.

3. Układy z petla synchronizacji fazowej

Ogólny schemat układu synchronizacji fazowej [1], [3], [4] przedstawiono na rys. 2. Poszczególne bloki oznaczają: DF - detektor fazy, F - filtr, VCO - sterowany napięciowo generator częstotliwości. Przy wykorzystaniu układów z PLL do sterowania układów prostowniczych częstotliwością wejściową synchronizującą jest częstotliwość sieci zasilającej lub jej p -ta wielokrotność, a częstotliwością wyjściową jest częstotliwość impuls-



Rys. 2. Ogólny schemat układu z pętlą synchronizacji fazowej

Fig. 2. General diagram of system with phase locked loop

sów taktujących podawanych na układy wyzwalaające. Wartość średnia napięcia wyjściowego zależy od przesunięcia fazowego pomiędzy stanowiącymi powielenie impulsów taktujących impulsami wyzwalaającymi odpowiednie zawory a zasilającymi te zawory napięciami. Gdy w układzie sterowania zastosować detektor o nastawialnej wartości przesunięcia fazowego pomiędzy impulsami taktującymi a napięciami wyzwalaającymi, to uzyska się możliwość sterowania wartości średniej napięcia wyjściowego. Zaletą takich układów jest ich mała wrażliwość na zakłócenia występujące w sieci zasilającej.

Przy konstrukcji pętli możliwe są dwa podejścia. Po pierwsze można korzystać jedynie z wielkości występujących w obwodach sterowania, po drugie - można wykorzystywać również wielkości występujące w układzie obciążenia.

W przypadku pierwszym uzyska się możliwość sterowania parametrów wyjściowych układu prostowniczego w układzie otwartym. Możliwości formowania charakterystyk statycznych będą przy tym takie same jak w układach sterowanych przez poziomowanie. Rozwiązanie takie będzie się jednak charakteryzowało gorszymi własnościami dynamicznymi od własności układów sterowanych przez poziomowanie. Wynika to z istnienia dodatkowych opóźnień spowodowanych pętlą sprzężenia zwrotnego. W dalszych rozważaniach zrezygnowano z analizowania własności tej grupy układów sterowania fazowego.

Przy drugim sposobie podejścia wykorzystuje się fakt, że dla prądów ciągłych zachodzi:

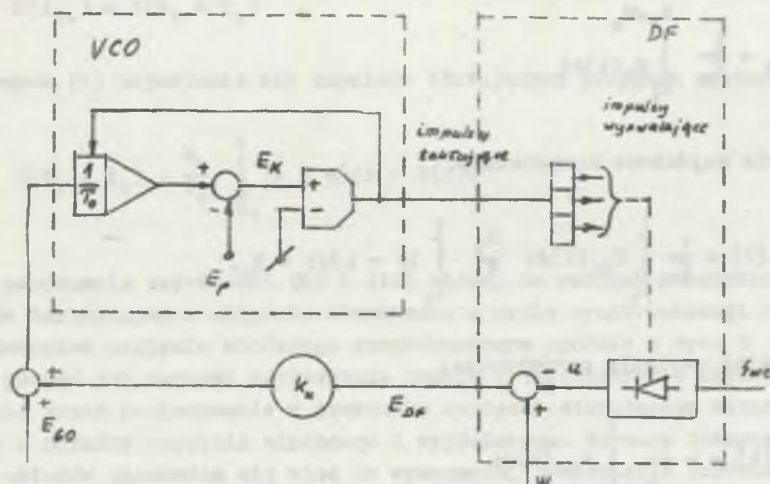
$$U_d \approx U_{d0} \cos \alpha,$$

a zatem dla prądów ciągłych układ prostowniczy stanowi pewnego rodzaju detektor fazy. Schemat układu sterowania fazowego z PLL synchronizacją od sieci zasilającej i wykorzystaniem wyjściowego napięcia wyprostowanego do oceny przesunięcia fazowego przedstawiono na rys. 3. Rolę detektora fazy w powyższym układzie pełni układ prostowniczy wraz z sumatorem, w którym od napięcia wiodącego w odejmuje się napięcie wyjściowe u. Różnica napięć:

$$E_{dp} = u - u$$

(3)

stanowi sygnał wyjściowy detektora. Jeśli przesunięcie fazowe pomiędzy impulsami taktującymi a napięciami zasilającymi jest właściwe, to napięcie E_{DF} jest równe zeru, jeśli nie, to napięcie E_{DF} jest różne od zera.



Rys. 3. Schemat układu sterowania prostownika z pętlą synchronizacji fazowej i synchronizacją napięciem wyjściowym

Fig. 3. Diagram of rectifier control system with phase locked loop and output voltage synchronisation

Jako sterowanego napięciem generatora VCO szczególnie korzystnie jest użyć integratora zerowanego w obwilach, gdy scałkowane napięcie E_G osiąga wartość napięcia przełączania E_p [4]. Rozwiązanie takie przyjęto na rys. 3. Pojawiające się w obwilach zrównania impulsy pełnią równocześnie rolę impulsów zerujących integrator i impulsów taktujących podawanych na układy wyzwalające. Dodatkową zaletą takiego rozwiązania jest to, że taki generator VCO stanowi filtr dolno-przepustowy, dzięki czemu często można zrezygnować ze stosowania w układzie dodatkowego filtra.

Oznaczono przez E_G napięcie sterujące generatora VCO stanowi sumę napięcia detektora fazy E_{DF} i napięcia wstępnego wysterowania generatora E_{G0} . Napięcie wstępnego wysterowania E_{G0} dobiera się przy tym tak, by przy braku sygnału z detektora fazy częstotliwość impulsów taktujących była p -tą wielokrotną częstotliwości napięcia sieci zasilającej.

4. Porównanie struktur sterowania

Występujące w przedstawionej na rys. 3 strukturze sterowania układu prostowniczego z PLL wielkości można formalnie opisać w sposób matematyczny. Napięcie przełączania wynosi wtedy:

$$E_p = \frac{1}{T_0} \int_{t_1}^{t_1 + T_0} E_{G_0}(t) dt \quad (4)$$

a napięcie wejściowe komparatora:

$$E_K(t) = \frac{1}{T_0} \int_{t_1}^t E_{G_0}(t) dt - \frac{k_k}{T_0} \int_{t_1}^t (w - u) dt - E_p. \quad (5)$$

Wprowadzając napięcie porównawcze:

$$S_G(t) = - \frac{1}{T_0} \int_{t_0}^t E_{G_0}(t) dt \quad (6)$$

uzyskuje się po prostych przekształceniach:

$$E_K(t) = - S_G(t) + S_G(t_1 + T_0) + \frac{k_k}{T_0} \int_{t_1}^t (w - u) dt \quad (7)$$

a warunek pojawienia się impulsów taktujących przyjmuje postać:

$$S_G(t_1 + T_0) + \frac{k_k}{T_0} \int_{t_1}^t (w - u) dt > S_G(t). \quad (8)$$

Gdyby w przedstawionym na rys. 1 układzie sterowania przez poziomowanie napięcia sterującego napięciem synchronizującym założyć napięcie sterujące równe całce z różnicy napięć wiodącego i wyjściowego (2), to warunek pojawienia się impulsów taktujących przyjąłby postać:

$$y(t_1) + \frac{k_k}{T_0} \int_{t_1}^t (w - u) dt > S(t) \quad (9)$$

przy czym:

$$y(t_1) = S(t_{1-}) \quad (10)$$

Jeśli założyć stały kształt napięcia synchronizującego, to:

$$S(t_{1-}) = S(t_1 + T_0) \quad (11)$$

a warunek (9) pojawiania się impulsów taktujących przyjmie postać:

$$S(t_1 + T_0) + \frac{k_k}{T_0} \int_{t_1}^t (w - u) dt > S(t). \quad (12)$$

Z porównania zależności (8) i (12) widać, że warunek powstawania impulsów taktujących w układzie sterowania z pętlą synchronizacji fazowej i zadawaniem napięcia wiodącego skonstruowanym zgodnie z rys. 3 ma taką samą postać jak warunek powstawania impulsów taktujących w układzie sterowania przez poziomowanie w przypadku napięcia sterującego stanowiącego całość z różnicy napięcia wiodącego i wyjściowego. Warunek równoważności tych układów sprowadza się więc do wymagania, by napięcie porównawcze $S_G(t)$ miało taki sam przebieg dla sąsiednich pulsów. Warunek ten jest między innymi spełniony w przypadku małych odchyłek od punktu równowagi. Należy przy tym jeszcze zwrócić uwagę na fakt, że pochodnej napięcia synchronizującego (ma ona istotny wpływ na własności dynamiczne układu objętego sprzężeniem zwrotnym) [2] odpowiada w układzie z PLL napięcie wstępnego wysterowania wzięte ze znakiem przeciwnym, jako że:

$$S'_G(t) = -E_{G0}(t).$$

Ponieważ prąd wyjściowy układu prostowniczego jest funkcją napięcia wyjściowego i siły elektromotorycznej obciążenia, można więc obwód zadawania prądu również wykorzystywać w charakterze nastawialnego detektora fazy. Taki detektor fazy będzie posiadał jednak dwie istotne cechy różniące go od detektora wykorzystującego obwód zadawania napięcia. Po pierwsze będzie on wprowadzał dodatkową inercję w obwód pętli sprzężenia zwrotnego, po drugie wystąpi w nim silne uzależnienie sygnału napięcia wyjściowego detektora od zakłóceń występujących w obwodzie głównym (wpływ siły elektromotorycznej obciążenia). Szczególnie niebezpieczne jest drugie z opisanych zjawisk. Może ono w przypadku większych zaburzeń powodować "przeskakiwanie" kąta opóźnienia o wartość równą średniemu kątowi impulsowania $\frac{2\pi}{p}$, a w efekcie niestabilną pracę układu.

Nawet w przypadku gdy dla warunku pracy ustalonej uzyska się opis układu z PLL i z poziomowaniem za pomocą identycznych równań, nie będzie to miało żadnej wartości praktycznej, a układ sterowania realizowany w taki sposób nie będzie się nadawał do aplikacji. W tej sytuacji zrezygnowano z poszukiwania analogii pomiędzy układem prostowniczym z zadawaniem prądu i sterowaniem przez poziomowanie oraz sterowaniem za pomocą pętli synchronizacji fazowej.

5. Podsumowanie

Rozważania teoretyczne skonfrontowano z badaniami na modelu symulacyjnym. Potwierdziły one przyjętą tezę, że objęty ujemnym napięciowym całkującym sprzężeniem zwrotnym układ prostowniczy sterowany przez poziomowanie napięcia sterującego napięciem synchronizującym i układ prostowniczy z zadawaniem napięcia i zastosowaniem pętli synchronizacji fazowej, jeśli są skonstruowane tak, by były spełnione przedstawione w rozdziale 3 relacje, posiadają w szerokim zakresie zmian parametrów identyczne własności statyczne i dynamiczne. Różnice w zachowaniu się tych układów występują dopiero przy dużych zakłóceniach, takich, które wymagają dla sąsiednich pulsów skokowej zmiany kąta opóźnienia o wartość rzędu $\frac{2\pi}{P}$ i większych. Przy tak dużych wartościach przyrostów kąta opóźnienia mogą wystąpić zaburzenia w pracy układu prostowniczego polegające na "przeskakiwaniu" kąta opóźnienia o wartość $\frac{2\pi}{P}$ względem zalecanego kąta opóźnienia.

LITERATURA

- [1] Bem D.J.: Pętla synchronizacji fazy. Hi-Fi Audio-Video 1/84. Wyd. NOT - SIGMA.
- [2] Krykowski K.: Zastosowanie równoważnego modelu impulsowego do oceny stanów przejściowych układów prostowniczych objętych sprzężeniem zwrotnym. IKK "Stany przejściowe w tyrystorach i układach tyrystorowych". Wyd. Politechnika Łódzka, Łódź 1985.
- [3] Nieznański J.: Pętla synchronizacji fazowej w układach sterowania fazowego przekształtników tyrystorowych. III KK Elektroenergetyczna Napędu Elektrycznego i Trakcji. Wyd. AGH, Kraków 1984.
- [4] Pelly B.R.: Tyrystorowe przekształtniki i cyklokonwertory. WNT, Warszawa 1976.

Recenzent: prof. dr inż. Mieczysław Wierzejski

Wpłynęło do redakcji dn. 15 czerwca 1986 r.

ОПРЕДЕЛЕННЫЕ АНАЛОГИИ МЕЖДУ ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫМИ СИСТЕМАМИ С ПЕТЛЕЙ ФАЗНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ И ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫМИ СИСТЕМАМИ УПРАВЛЯЕМЫМИ ПРИ ПОМОЩИ СРАВНИВАНИЯ СИНХРОНИЗУЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

Р е з ю м е

Формально преобразовывая уравнения изображения системы с петлей фазной синхронизации и обратной связи по выпрямленному напряжению, получены отношения изображающие момент появления импульсов зажигающих вентили аналогичны к соответствующим отношениям для управления использующего сравнение управляющего напряжения синхронизирующим напряжением в системе с обратной связью по напряжению. Предварительное управляющее напряжение для систем с петлей фазной синхронизации должно при этом быть пропорциональное к производной синхронизирующего напряжения для систем со сравнением. Это дало возможность сделать вывод, что в определенных условиях системы с петлей фазной синхронизации обеспечивают такие же статические и динамические свойства выпрямителя как системы со сравнением управляющего напряжения и синхронизирующего напряжения, в которых применено обратную связь по напряжению.

SOME ANALOGIES BETWEEN RECTIFIER SYSTEMS WITH PHASE LOCKED LOOP AND THE ONES CONTROLLED WITH COMPARISON OF REFERENCE VOLTAGE

S u m m a r y

By formal changing the equations, which are describing a system with phase locked loop and feedback from output voltage. Expressions which describe a moment of appearing tripping pulse of valves are obtained. This expressions are analogous to the suitable expressions of a control with a comparison of control voltage and reference voltage in a system with the negative voltage feedback. Preliminary control voltage for the systems with phase locked loop ought to be proportional to derivate of reference voltage in systems with a comparison. It allows to conclude, that in definite events the systems with phase locked loop secure the same statical and dynamical properties as the systems with comparison of control voltage and reference voltage in case negative voltage feedback.