

A.P. DOŁGOW,

A.K. LANDMAN

S.N. UDAŁOW,

W.M. CZEBAN

Nowosybirski Instytut Elektrotechniki (NETI)

Z S R R

AUTOMATYCZNE STEROWANIE SAMOROZRUCHEM DUŻYCH SILNIKÓW SYNCHRONICZNYCH

Streszczenie. W artykule analizowane są możliwości symocznego załączania rezerwy (SZR) z dyskretnym przesunięciem fazowym. Komutacja taka dokonywana jest za pomocą urządzeń zbudowanych w oparciu o uproszczone modele matematyczne elektromechanicznych procesów przejściowych, zachodzących w systemach elektroenergetycznych. Możliwość i celowość zastosowania tego rodzaju urządzenia, opartego na wybranym modelu zweryfikowano na drodze doświadczalnej. Uwzględniono także zagadnienia kompensacji niektórych błędów modeli. Wynik pomiarów wykonanych zarówno dla zamodelowanych układów elektromechanicznych, jak i dla obiektów rzeczywistych pracujących w przemyśle potwierdzają przydatność i celowość stosowania w warunkach produkcyjnych, zarówno proponowanej metodyki, jak i wykonanych urządzeń.

PROPONOWANA METODYKA

Zarówno przerwy w zasilaniu, jak i obniżenie napięcia o różnej wielkości i czasie trwania mogą stać się bezpośrednią przyczyną poważnych zakłóceń w pracy zakładów przemysłowych prowadzących ciągle procesy technologiczne.

Bezpośrednią przyczyną zakłóceń procesu produkcyjnego, powodującą w efekcie przerwy w produkcji, są często zakłócenia w pracy pomp i sprzężarek napędzanych silnikami synchronicznymi (S.S). Poprawę stabilności procesu technologicznego i znieszenie go na wymuszenia występujące w układach zasilających można uzyskać poprzez zapewnienie niezawodnej pracy ww. agregatów, a więc i m.in. poprzez stworzenie warunków korzystnego przebiegu samorozruchu silników elektrycznych.

Teoria samorozruchu S.S. w dobie obecnej jest już dostatecznie dobrze opracowana i pozwala rozwiązywać praktyczne problemy. Jednak mimo określonych doświadczeń wykorzystywanie tradycyjnych metod samorozruchu nie zawsze prowadzi do pożądaných wyników. Istniejące metody można podzielić na dwie niezależne grupy [1].

Pierwsza grupa metod uniemożliwiająca utrzymanie synchronicznej dynamicznej stabilności (SDS), także może być rozdzielona na dwie części obejmujące:

1. Gaszenie pola uzwojeń wirnika S.S. w celu obniżenia SEM i zmniejszenia prądu przy niesynchronicznym włączeniu.
2. Samorozruch bez gaszenia pola uzwojenia wirnika S.S.

Gaszenie pola uzwojenia wirnika S.S., przy występowaniu wzbudnicy elektromaszynowej, realizowane jest przez włączenie dodatkowego opornika do obwodu wzbudnicy, względnie bezpośrednio do obwodu wirnika. W przypadku stosowania statycznych układów wzbudzenia, gaszenie pola realizowane jest przez wprowadzenie wzbudnicy w inwertorowy stan pracy. Samorozruch S.S. bez gaszenia pola wirnika możliwy jest tylko dla określonego typu maszyn. Rozwiązania konstrukcyjne takich maszyn powinny dopuszczać niesynchroniczne włączanie, w warunkach gdy napięcie sieci znajduje się w przeciwfazie w stosunku do SEM silnika. Silnikami takimi są np. silniki typu STD.

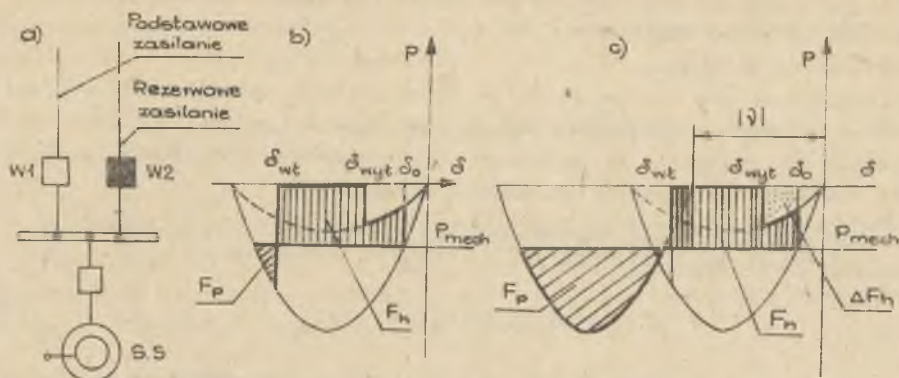
Druga grupa metod samorozruchu pozwalająca zachować S.D.S. nie znalazła dotychczas zbyt szerokiego zastosowania w przemyśle. Jednak w miarę powiększania mocy jednostkowych S.S. atrakcyjność tych metod wzrasta. Do grupy tych metod zaliczyć można metody z zastosowaniem SZR i dyskretnego sterowania fazowego (DSF) tak w obwodach wirnika, jak i stojana S.S.

W NETI, w Katedrze Systemów Elektroenergetycznych zaproponowano sposób dyskretnego sterowania fazowego stanami dynamicznymi S.S. Sposób ten pozwala przy minimalnych prądach niesynchronicznego włączenia zapewnić zachowanie S.D.S. [2].

Istotą metody fazowego sterowania samorozruchem S.S., po przerwaniu zasilania, jest podawanie na S.S. napięcia, będącego w fazie z SEM silnika.

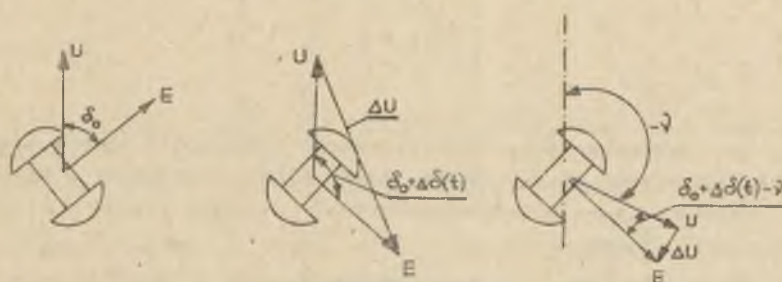
W celu realizacji tego zadania, idealne urządzenie zmieniające fazę powinno bez przerwy śledzić zmianę fazy SEM silnika w awaryjnym stanie pracy i redukować do zera różnicę faz pomiędzy wektorami SEM i napięcia zasilania w chwili włączenia. Praktyczne dopasowywanie faz realizowane jest za pomocą wyłącznika, w którym dokonuje się wcześniej cyklicznej zmiany faz z częstością $-\frac{2}{3} k\pi$ stopni elektrycznych (k - liczba oalkowita). Problem jednak stanowi automatyczne określenie momentu podawania sygnału na włączenie tego wyłącznika. W przypadku dokonania przesunięcia fazowego o $2 k\pi$ stopni elektrycznych zmiana faz nie jest wymagana.

Na rys. 1 pokazano schemat zasilania silnika, w którym dopasowywanie faz realizowane jest na wyłączniku źródła rezerwowego, a na rys. 2 położenie wektorów napięcia zasilającego i SEM silnika. Przy wystąpieniu zakłócenia w zasilaniu podstawowym wirnik silnika hamuje, przez co różnie przesunięcia kątowe pomiędzy napięciami zasilających i SEM silnika. Następnie wyłącza się wyłącznik źródła podstawowego, a załącza wyłącznik źródła rezerwowego. Kąt fazowy napięcia źródła rezerwowego i SEM silnika synchronicznego określony jest na podstawie kąta rozchyłu $\delta_0 + \Delta\delta(t)$ (na rysunku $\psi = -120^\circ$ elektrycznych). W takich warunkach mała jest różnica ΔU , która wymusza prąd niesynchronicznego włączania. Określona jest ona przy tym przypadkowymi czynnikami (rozrzutami czasów działania wyłącznika, błędami oceny wyjściowego stanu pracy itp.).



Rys. 1. Schemat zasilania silnika

a - oraz kątowe charakterystyki mocy i pola przyspieszające i hamujące, b - przy normalnym SZR, c - przy SZR z przesunięciem fazowym w obwodzie sterującym o 120°



Rys. 2. Położenie wektorów napięcia zasilającego i SEM silnika

a - w wyjściowym stanie pracy, b - w chwili włączenia wyłącznika SZR bez przesunięcia fazowego, c - w chwili włączenia wyłącznika SZR z przesunięciem fazowym w obwodzie sterującym o stopni elektrycznych

Realizacja przesunięcia fazowego pozwala nie tylko znacznie obniżyć prąd samorozruchu, ale umożliwia również zachowanie S.D.S. silnika. Sytuację taką ilustruje rys. 1b i 1c. Przy zacięciu i wyłączeniu źródła podstawowego wirnika silnika zaczyna hamować. Energia hamowania przy zwykłym SZR bez przesunięcia faz przewyższa energię przyspieszenia i w efekcie naruszona zostaje stabilność dynamiczna. W przypadku ZSR z przesunięciem fazowym przesuwają się stopni elektrycznych kątową charakterystykę mocy. W efekcie energia przyspieszenia wzrasta i stabilność dynamiczna zostaje zachowana.

Przy stosowaniu sterowania dyskretnego proces dynamicznych zmian można podzielić na następujące etapy:

- a) ustalenie momentu naruszenia stanu pracy i wysłanie sygnału sterującego wyłączającego zakłócenie,
- b) odłączenie zakłócenia,
- c) określenie zwłoki czasowej Δt , po upływie której podany zostaje rozkaz na załączenie wyłącznika źródła rezerwowego (zwłoka Δt jest konieczna dla uzyskania zgodności położenia wektorów SEM silnika i napięcia zasilającego w chwili załączania wyłącznika).

W chwili zamykania się styków głównych wyłącznika źródła rezerwowego koniecznym jest spełnienie relacji

$$\delta_0 = \Delta \delta(t) = \varphi \quad (1)$$

Przeanalizujemy przebieg procesu w czasie cyklu SZR. Równanie różniczkowe opisujące procesy przejściowe w maszynie synchronicznej można przy określonych założeniach przedstawić w postaci:

$$T_j \frac{d\delta}{dt} = P_{\text{mech}} - \frac{P_0}{\sin \delta_0} \sin \delta$$

$$\frac{d\delta}{dt} = s$$

gdzie:

- P_{mech} - moc czynna silnika synchronicznego w ustalonym stanie pracy,
- T_j - mechaniczna stała czasowa układu silnik - urządzenie napędzane,
- P_0 - wielkość mocy elektromagnetycznej S.S. przy awarii w pierwszej chwili czasu.

Jeżeli czas niezbędny do otwarcia wyłącznika τ_{otw} jest na tyle mały, że nie zdążył osiągnąć jeszcze znaczącej wartości (większej od 5%), wtedy istnieje możliwość nieuwzględniania w równaniach ruchu momentu asynchronicznego. Pomimo tego realizacja przedstawionego algorytmu stanowi poważny problem. Z tych powodów proponuje się uproszczony model sterowania. Model ten pozwala określać chwilę, w której należy wprowadzić przesunięcie fazowe oraz zdeterminować wielkość przerwy bezprądowej przy stałej wielkości zrzutu mocy czynnej. Uproszczenie więc uzyskiwane jest w efekcie przyjęcia założenia $P_0 = 0$. Taki model matematyczny sterowania zakłada, że moc czynna pobierana przez maszynę synchroniczną jest równa zeru, co ma miejsce jedynie w przypadku 3-fazowego zwarcia na zaciskach silnika lub przy odłączeniu napięcia zasilającego.

Gdy obniżenie napięcia jest mniejsze, co ma miejsce np. przy zwarciu jednofazowym, wtedy model może wprowadzać pewne błędy przy sterowaniu chwilą wprowadzenia przesunięcia fazowego φ .

Zastosowanie przedstawionego modelu jest korzystne, w przypadku gdy stała czasowa $T_j > 5s$, a aparatura komutacyjna charakteryzuje się krótkimi czasami potrzebnymi do otwarcia wyłącznika - τ_{otw} .

Dla zaproponowanego modelu obliczono błąd sterowania, przy czym zmieniano zarówno parametry silnika - T_j , jak i stanu pracy. Błąd sterowania określano z następującej zależności:

$$\Delta = \varphi - \left[\delta_{otw} + S_{otw} (t_1 + \tau_{wyl}) + \frac{P_{mech}}{2 T_j} (t_1 + \tau_{wyl})^2 \right],$$

gdzie:

δ_{otw} , S_{otw} - kąt wirnika S.S. i poślizg w chwili odłączenia zakłócenia,
 τ_{wyl} - czas własny wyłącznika potrzebny do jego otwarcia.

Wielkość Δ zależy, jak wynika z rys. 1, od błędu określenia energii hamowania ΔF_H . Wartości błędu Δ zestawiono w tabelicy 1.

Tabela 1

$P_{mech} - P_e$ [j.w.]	0,4			0,6		
T_j [s] \ τ_{otw} [s]	0,12	0,09	0,06	0,12	0,09	0,06
15	25	19	13	13	10	6
11	28	21	15	14	10,5	7
7	34	26	18	17	12,5	8
5	40	31	22	21	18	13

Wyniki obliczeń otrzymano przy $\varphi = 120^\circ$ i współczynnika obciążenia S.S. równym 0,8.

Jak można zauważyć (p. tabl. 1) w wielkości błędu Δ występuje pewna systematyczność (powtarzalność) polegająca na tym, że kąt włączenia dla różnych zakłóceń (oprócz zwarcia 2-fazowego na zaciskach S.S.) jest zawsze mniejszy od wielkości optymalnego kąta włączenia φ . W związku z tym, aby uniknąć błędu systematycznego, którego wielkość zależy od rodzaju zakłócenia, należy wprowadzić do modelu pewną poprawkę ξ , która określona jest przez następującą relację

$$\xi = \sum_{i=1} \Delta_i P_i, \quad (2)$$

gdzie:

Δ_1 - błąd w sterowaniu przy konkretnym zakłóceniu,

P_1 - prawdopodobieństwo powstania tego zakłócenia.

Uwzględniając wzór (2) kąt włączenia określa się w następujący sposób:

$$\delta_{w1} = \varphi + \xi$$

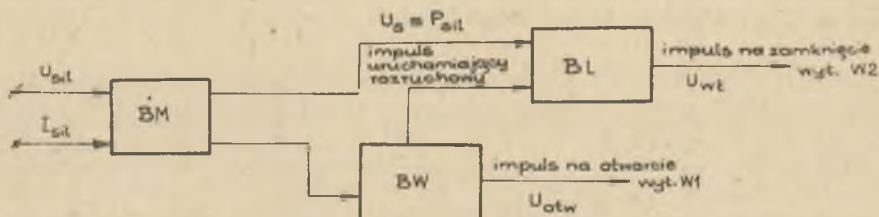
Na przykład dla S.S. z $T_j = 5s$ i $\tau_{otw} = 0,09$ i przy przyjęciu do rozważań 1-, 2- i 3-fazowych zwarcie z prawdopodobieństwem odpowiednio równym $p_1 = 0,7$; $p_2 = 0,25$; $p_3 = 0,05$ poprawka będzie równa:

$$\xi = 31^\circ \cdot 0,7 + 18^\circ \cdot 0,25 + 0^\circ \cdot 0,05 = 26,2^\circ.$$

Przy uwzględnieniu obliczonej poprawki ξ wielkość błędu w kącie włączenia, przy najbardziej prawdopodobnych rodzajach zwarć, będzie wynosiła w przybliżeniu: 4° - przy zwarciu 1-fazowym, 8° - przy zwarciu 2-fazowym.

Uproszczony model matematyczny zastosowano w automatycznym urządzeniu sterowania samorozruchem S.S. z fazowym przesunięciem w uzwojeniu stojana [3]. Schemat blokowy urządzenia pokazano na rys. 3. Urządzenie realizuje następujące operacje:

- wyłączanie wyłącznika uszkodzonego toru,
- załączanie wyłącznika rezerwowego toru.



Rys. 3. Schemat blokowy urządzenia sterowania
BM - blok mocy, BW - blok wyłączeń, BL - blok liczący

Na wejście urządzenia podawane są w sposób ciągły z transformatorów prądowego i napięciowego impulsy proporcjonalne do prądu i napięcia silnika. Moc w przedawaryjnym stanie pracy zapamiętywana jest w bloku mocy. Blok ten podaje impuls do bloku wyłączeń w przypadku zakłócenia (przy nagłym zrzućcie mocy). Blok wyłączeń kształtuje impulsy na wyłączenie i uruchamia blok liczący. Blok ten określa z kolei zwłokę czasową podania impulsu na zamknięcie wyłącznika toru rezerwowego na podstawie zależności:

$$\tau = \sqrt{\frac{2T_j (\delta_0 - \varphi + \xi)}{P_{\text{mech}}}} - \tau_{w1}$$

W efekcie zwłoka czasowa zależy tylko od wielkości P_{mech} , czyli określona jest przez obciążenie silnika w przedzakłóceńowym stanie pracy.

Wykorzystując przedstawioną metodę sterowania samorozruchem S.S. przeprowadzono cały szereg wszechstronnych badań. Badania te obejmowały zarówno obliczenia wykonywane na maszynie analogowej i cyfrowej, próby przeprowadzane na modelach elektrodynamicznych oraz praktyczne doświadczenia wykonywane w warunkach przemysłowych (ogólne wyniki badań zestawiono w tabeli 2). Wyniki badań potwierdzają dużą efektywność metody i sugerują celowość jej zastosowania. Metoda zapewnia szybszy samorozruch przy zachowaniu równowagi dynamicznej oraz w większości przypadków małe prądy. W przypadku gdy SZR realizowane jest przy wykorzystaniu wyłączników mających duży czas własny (0,4s i większy), a silnik o małej T_j mający małą pręd-

kość obrotową przeciążony jest mocą czynną, metoda może okazać się mało efektywna.

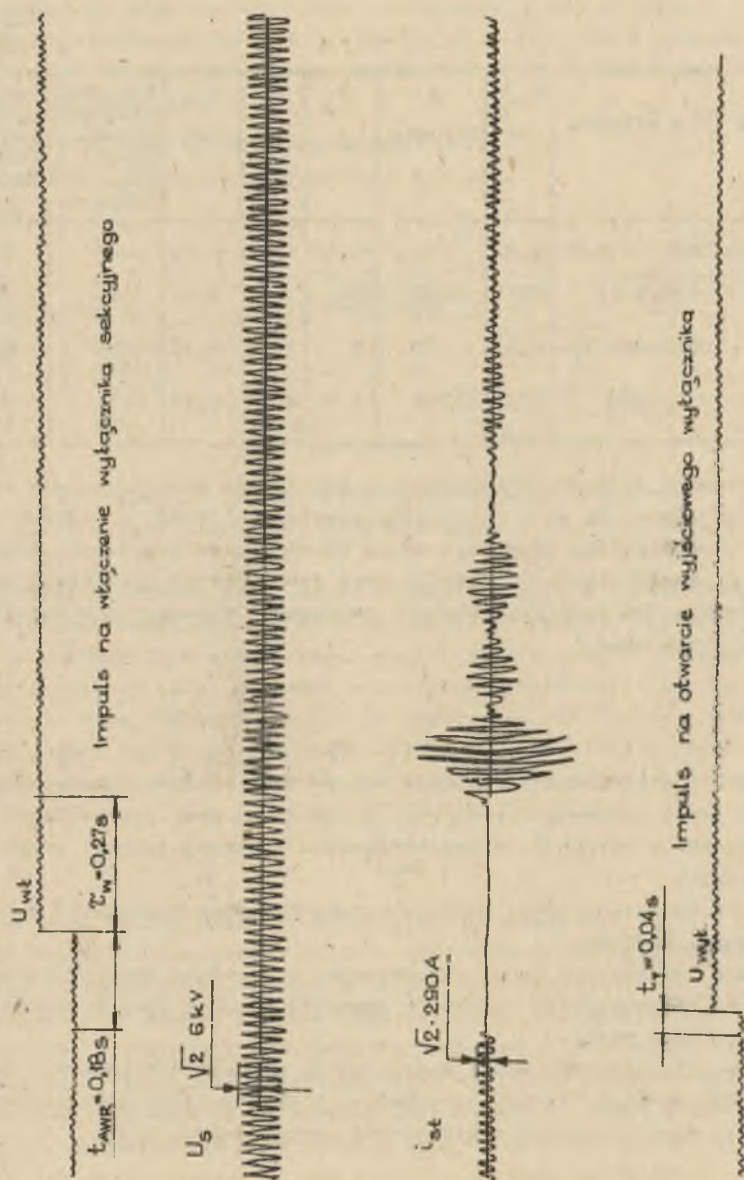
Tablica 2

Typ napędu	Typ silnika	P_{nom} MW	P obr/min.	T_j s	X_d' jw.	X_d'' jw.	Właściwa wielkość przesunięcia faz. stop. sl.	Optymalny czas przerwy bezprądowej
Pompa wodna	SND-14-46-8	0,8	750	1,56	1,5	0,25	-240	0,25
Turbokompresor	-210/0,31	0,7	3000	14	1,82	0,28	-120 -240	0,40 0,60
Kompresor	DSKZ-260-29-32	0,8	167	3	1,96	0,26	-240 -360	0,28 0,34
Turbokompresor	STD-6300	6,3	3000	2,9	2,15	0,27	-240 -360	0,28 0,34

W praktycznych próbach wykorzystywano urządzenie automatycznego sterowania samorozruchem. Na rys. 4 pokazano oscylogram jednej z takich prób. Analizując przedstawione przebiegi można zauważyć, że urządzenie zapewnia małe prądy w czasie włączania silnika oraz dobrą jakość przebiegów przejściowych. Potwierdza to prawidłowość i poprawność dokonanych w modelu matematycznym uproszczeń.

WNIOSKI

1. W artykule zaproponowano efektywną metodę SZR silników synchronicznych, która zapewnia zachowanie równowagi dynamicznej przy jednoczesnym zmniejszeniu prądów niesynchronicznego włączania i dobrej jakości przebiegów przejściowych.
2. Zalety metody potwierdzono zarówno w teoretycznych badaniach jak i w praktycznych próbach.
3. Opracowano uproszczony model matematyczny sterowania samorozruchem z dyskretnym przesunięciem fazowym w obwodzie stojana oraz metodykę kompensacji błędów modelu.
4. W oparciu o uproszczony model matematyczny wykonano urządzenie sterowania samorozruchem. Przemysłowe próby, którym poddano urządzenie potwierdziły dopuszczalność zastosowania uproszczonych modeli.



Rys. 4. Dynamiczne przejście S.S. typu STD z przesunięciem fazowym o 360° elektrycznych za pomocą urządzenia automatycznego sterowania

LITERATURA

- [1] Gołodnow J.M., Horenjan A.H.: Samozapuk elektrodwigatielej Energija, 1974.
- [2] Czaban W.M., Landman A.K., Udałow C.N.: Sposób powyszienia nadzieźności samozapaska synchronnych dwigatielej. Nowosybirsk, Informacionnyj Listok, Nr 266-77, 1977.
- [3] Udałow C.N.: Diskrietnoje fazowoje upravlienije dinamiczeskimi pieriechodnymi synchronnych dwigatielej. Awtoriefierat kandidatskoj disiertaczi, Nowosybirsk 1978.

Wpłynęło do Redakcji dnia 20.VI.1980 r.

Recenzent:

doc. dr inż. Edward Lawera

АВТОМАТИЧЕСКИЕ УПРАВЛЕНИЕ САМОЗАПУСКОМ
КРУПНЫХ синхронных ДВИГАТЕЛЕЙ

Р е з ю м е

В статье исследуются возможности управления автоматическим вводом резерва АВР с дискретным фазовым сдвигом устройствами, построенными на упрощенных математических моделях электромеханических переходных процессов в электрических системах. Изучены вопросы компенсации некоторых ошибок модели. На основе выбранной модели реализовано устройство управления, возможности которого апробированы путем натурального эксперимента на электродинамической модели и на промышленных предприятиях. Полученные результаты опытных испытаний позволяют рекомендовать предлагаемый способ и устройство управления к практическому использованию в промышленных условиях.

AUTOMATIC CONTROL OF SELF-ACCELERATION OF LARGE
SYNCHRONOUS MOTORS

S u m m a r y

The technical ability of auto-closing with discrete phase shift are discussed. Such commutation is realized by the help of devices constructed on the basis of simplified mathematical models of electro-mechanical transients arising in electrical power systems. The possibilities of these devices have been verified experimentally. The compensation of some model errors has been taken into account. Results, obtained both from laboratory tests as well as from investigations performed on real motors operating in industry plants, have shown that the proposed method and the described devices are necessary and useful in operating conditions.