

# MODELOWANIE STRAT MOCY W SILNIKACH ROBOTA FANUC AM100iB ORAZ W JEGO SYSTEMACH ENERGOELEKTRONICZNYCH

Jerzy Świder<sup>1a</sup>, Adrian Zbilski<sup>1b</sup>

<sup>1</sup> *Institut Automatyizacji Procesów Technologicznych i Zintegrowanych Systemów Wytwarzania,  
Politechnika Śląska*

<sup>a</sup>*jerzy.swider@polsl.pl*, <sup>b</sup>*adrian.zbilski@polsl.pl*

## Streszczenie

W pracy przedstawiono problematykę modelowania mocy strat w silnikach robota FANUC AM100iB oraz w jego systemach energoelektronicznych. Do opisu zastosowano rozróżnienie między stratami pasywnymi oraz aktywnymi. Analizą objęto cały zakres wartości momentów napędowych oraz prędkości obrotowych silników robota wraz z pracą silników w stanie zwarcia. Straty pasywne opisano hipotetycznymi mapami strat, sporządzonymi na podstawie analizy map sprawności badanych silników oraz systemu energoelektronicznego.

**Słowa kluczowe:** straty mocy, silniki, system energoelektroniczny, robot, modelowanie

## MODELING OF THE POWER OF LOSSES IN THE FANUC AM100iB ROBOT DRIVES AND IN ITS POWER ELECTRONIC SYSTEMS

### Summary

In the paper presents issues involve modeling the power losses in FANUC AM100iB robot drives and in its power electronic systems. In the description the differentiation between passive and active losses were used. The analysis covered the whole ranges of the torque and the whole ranges of the speed, which the robot's drives acting in, includes the motor's work with stall torque. The passive losses described by hypothetical maps of losses, which were drawn up based on efficiency maps of investigated motors and power electronic systems.

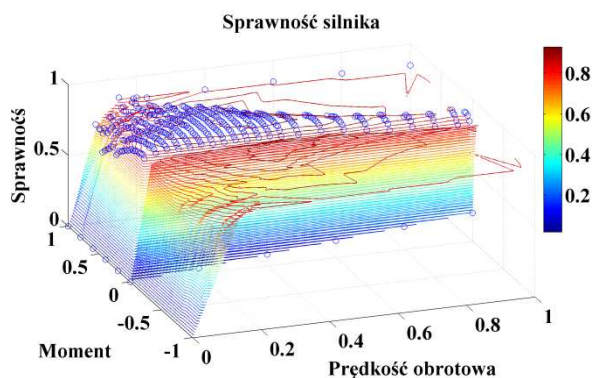
**Keywords:** power of losses, electric motors, power electronics, robot, modeling

## 1. WSTĘP

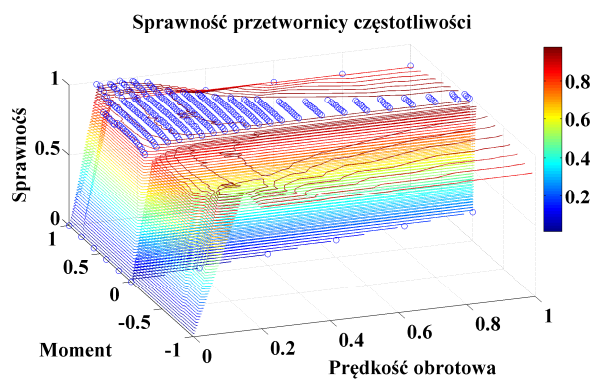
Na podstawie analizy map sprawności wielu silników synchronicznych oraz asynchronicznych [1, 2, 3], wnioskowano o ogólnej postaci mapy sprawności elektro-technicznej tych maszyn. Niezależnie od mocy silnika jego sprawność zawsze rozkłada się w sposób przedstawiony na rysunku (rys. 1), [1, 3]. Przytoczoną mapę sprawności wykonano w oparciu o wyniki badań silnika PMSM o mocy 50 kW, zasilanego przetwornicą energoelektroniczną charakteryzującą się swoją sprawnością [1, 3]. Ze względu na analizę energochłonności, do obli-

czeń strat mocy zastosowano również sprawność zasilającej silnik przetwornicy (rys. 2) [3]. Wynikiem obu rodzajów strat jest mapa całkowitej sprawności, na podstawie której dokonano kolejnych operacji prowadzących do wyznaczenia strat mocy całego systemu (rys. 3) [3]. Na przedstawionych wykresach zakresy prędkości oraz momentu napędowego badanego silnika znormalizowano wartością maksymalną. Dzięki temu oba parametry posiadają identyczny zakres wartości mieszczących się między zerem a jedyneką.

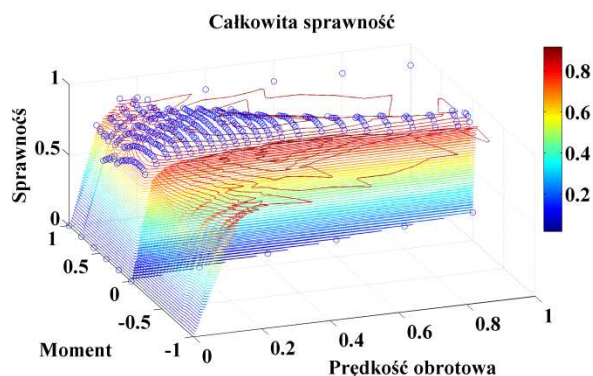
Z uwagi na niekompletne informacje dotyczące wyników pomiarów sprawności silników oraz energoelektroniki, przyjęto ustalenia określające logiczne uzupełnienie brakujących danych. Dotyczyły one obszarów bliskich zerowej prędkości obrotowej wału oraz obszarów bliskich zerowemu momentowi napędowemu silnika. Wzdłuż osi zerowej prędkości obrotowej wału, wartość użytecznej mocy mechanicznej wynosi zero. Zgodnie z tym faktem, sprawność maszyn i urządzeń pracujących w stanie zerowej prędkości wynosi zero. Dlatego wartością taką uzupełniono oś zerowej prędkości. Jeżeli silniki nie są obciążane oporami zewnętrznymi a jedynie oporami od łożysk i jednocześnie ich prędkość jest niezerowa to logicznym faktem jest występowanie w takim stanie minimalnej sprawności silników i energoelektroniki. Taki stan pracy silników nazywany jest pracą biegu jałowego. W związku z tym, oś zerowego momentu napędowego arbitralnie uzupełniono liniowo narastającą sprawnością w zakresie od 0 do 20%. Ponieważ w typowych aplikacjach stosowane silniki nie pracują w tak osobliwych stanach, dlatego obszary te badane są rzadko a znane wyniki badań nie pozwalają na praktyczne ich zastosowanie. Natomiast w przypadku silników stosowanych w robotyce opisane stany występują permanentnie, dlatego muszą być uwzględniane w analizie energochłonności. Wykresy (rys. 1), (rys. 2), (rys. 3) reprezentują sprawność przetwarzania energii elektrycznej czynnej na moc mechaniczną rozwijaną na wale wyjściowym silnika. Dzięki temu umożliwiają obliczanie strat mocy silnika PMSM o dowolnej mocy nominalnej, pracującego z niezerową prędkością. W stanie zwarcia, to znaczy w czasie pracy silnika z zerową prędkością obrotową i obciążonego niezerowym momentem oporowym mechaniczna moc wyjściowa na jego wale równa jest zeru.



Rys. 1. Szacunkowo zrekonstruowane mapy strat mocy silników



Rys. 2. Szacunkowo zrekonstruowane mapy strat mocy serwowzmacniacza napędów robota FANUC AM100iB



Rys. 3. Szacunkowo zrekonstruowana mapa całkowitych strat mocy silników oraz serwowzmacniacza napędów robota FANUC AM100iB.

Wówczas pobierana z sieci elektrycznej moc elektryczna w większości pochłaniana jest na pokonanie oporów elektrycznych w uzwojeniach i wydzielana jest w postaci ciepła. Badania nad mocą strat silników PMSM pracujących w stanie zwarcia nie są na tyle popularne, aby na ich podstawie opracować wystarczająco realistyczne modele matematyczne lub mapy strat mocy, które znalazłyby zastosowanie podczas analizy energochłonności. Z tego względu w celu ich zrekonstruowania przyjęto logiczne ustalenia, które nie dopuszczają do zaburzenia bilansu energetycznego badanych maszyn.

## 2. SZACUNKOWA REKONSTRUKCJA MAP STRAT MOCY SILNIKÓW BADANEGO ROBOTA

Do wykonania analizy energochłonności robota przemysłowego – czyli mechanicznego ramienia oraz układu sterującego jego pracą, opracowano charakterystyki definiujące moc strat pasywnych oraz aktywnych. Straty analizowano we wszystkich kanałach dystrybucji energii elektrycznej. Jako pojedynczy kanał rozumie się ścieżkę od gniazda sieci elektrycznej do pojedynczego silnika elektrycznego robota. Jako pasywne straty mocy rozumie się straty energii elektrycznej podczas pracy urządzeń w stanie zwarcia. Za aktywne straty mocy

uznaje się straty energii elektrycznej podczas pracy silników z niezerową prędkością obrotową. Przyjęto również ustalenie, że sposób przejścia ze stanu pasywnego do stanu aktywnego następuje płynnie lecz w obszarze najbliższego sąsiedztwa zerowej prędkości obrotowej wałów silników. Wartości całkowitych strat mocy obliczono jako sumę pasywnych oraz aktywnych strat mocy (1). Wartości strat aktywnych (7) wynikają bezpośrednio z bilansu energetycznego (2) i wyrażenia na sprawność silników oraz energoelektroniki (3).

$$p_i = p_i^p + p_i^a \quad (1)$$

$$p_i^{wej} = p_i^{wy} + p_i^a \quad (2)$$

a także:

$$\eta_i = \frac{p_i^{wy}}{p_i^{wej}} \quad (3)$$

$$p_i^{wy} = \tau_i^d \cdot \dot{q}_i \cdot i_i^{-1}, \forall P_i^{wy} \leq P_{i,max} \quad (4)$$

stąd:

$$p_i^{wej} = \frac{p_i^{wy}}{\eta_i} \quad (5)$$

zatem:

$$\frac{p_i^{wy}}{\eta_i} = p_i^{wy} + p_i^a \quad (6)$$

ostatecznie:

$$p_i^a = \frac{(1-\eta_i)}{\eta_i} \cdot p_i^d, \forall \eta_i \neq 0 \quad (7)$$

gdzie:

$$\frac{(1-\eta_i)}{\eta_i} = \eta_i^{odwr}, \forall \eta_i \neq 0 \cap \frac{(1-\eta_i)}{\eta_i} \leq \frac{p_{max,i}^{wej}}{p_i^{wy}} \quad (8)$$

Parametry  $p_i$ ,  $p_i^p$  i  $p_i^a$  – opisują wartości odpowiednio całkowitych, pasywnych oraz aktywnych strat mocy, parametry  $p_i^{wej}$  oraz  $p_i^{wy}$  – opisują odpowiednio moc wejściową oraz moc wyjściową, parametr  $\eta_i$  – to sprawność elektrotechniczna. Symbol  $\tau_i^d$ , oznacza moment napędowy silnika,  $\dot{q}_i$  to prędkość kątowna napędzanego członu natomiast symbol  $i_i$  oznacza przełożenie przekładni mechanicznej. Indeksy  $i$  określają numer analizowanego napędu maszyny. Równanie (8) określa zależność między wartością aktywnych strat mocy i wartością mocy wyjściowej. Równanie jest spełnione, gdy sprawność jest różna od zera i przyjęto że musi być niższa niż stosunek maksymalnej mocy wejściowej i mocy minimalnej. Wprowadzone ograniczenie zabezpiecza przed generowaniem bardzo dużych wartości w najbliższym sąsiedztwie zerowej sprawności.

Na podstawie równania (8), opracowano mapy relacji  $MR_i$  między mocami mechanicznymi i mocami ciepła, emitowanego przez silniki oraz energoelektronikę robota (9). Do sporządzenia map aktywnych strat w każdym kanale zastosowano również mapy mocy mechanicznych  $MMM_i$  wszystkich silników (10). Następnie stosując wyrażenie (7) oraz mapy mocy mechanicznych i mapy relacji, opracowano mapy aktywnych strat mocy  $MASM_i$  (11), (Rys. 4).

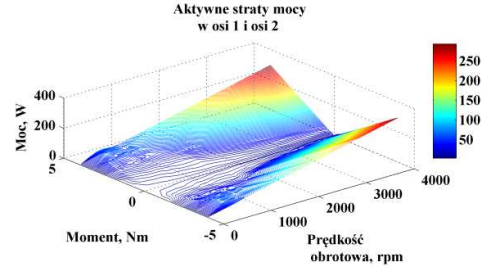
$$MR_i(\tau_i^d, \dot{q}_i^d) = \eta_i^{odwr}(\tau_i^d, \dot{q}_i^d) \quad (9)$$

$$MMM_i(\tau_i^d, \dot{q}_i^d) = \tau_i^d \cdot \dot{q}_i^d \quad (10)$$

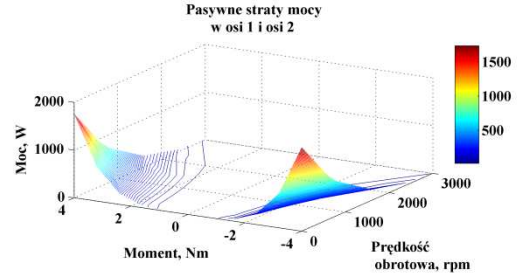
$$MASM_i(\tau_i^d, \dot{q}_i^d) = p_i^a(\tau_i^d, \dot{q}_i^d) \quad (11)$$

Przy sporządzaniu map pasywnych strat mocy przyjęto ustalenia określające ich postać ogólną. Uznano, że w stanie zwarcia i podczas pracy z maksymalnym momentem trzymającym, straty mocy równe są maksymalnej mocy wejściowej do silnika, który zaprojektowano tak, aby taką moc przyjmował (12).

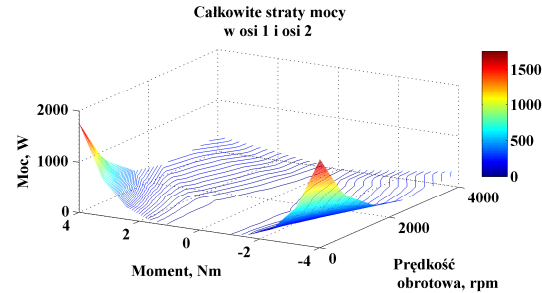
$$p_{i,max}^p = p_{i,max}^{wej} \quad (12)$$



Rys. 4. Zrekonstruowane mapy aktywnych strat mocy kolejno od lewej w 1 i 2 osi, 3 i 4 osi; na dole od lewej w 5 osi i 6 osi



Rys. 5. Zrekonstruowane mapy pasywnych strat mocy kolejno od lewej w 1 i 2 osi, 3 i 4 osi; na dole od lewej w 5 osi i 6 osi



Rys. 6. Zrekonstruowane mapy całkowitych strat mocy kolejno od lewej w 1 i 2 osi, 3 i 4 osi; na dole od lewej w 5 osi i 6 osi

Przyjęto również, że straty pasywne nie zanikają natychmiast po uruchomieniu wału silnika, lecz występują równocześnie ze stratami aktywnymi w pewnym początkowym zakresie prędkości kątownej. Wraz ze wzrostem prędkości, straty pasywne uznaje się za znikome lub zerowe. Znormalizowane mapy pasywnych strat mocy  $MPSM_i$  sporządzono zatem na podstawie równania (13), (rys. 5).

$$MPSM_i(\xi_x, \xi_y) = [(1 - \xi_x) \cdot \xi_y]^4 \cdot p_{i,max}^p, \xi_x \in < 0; 1 > \cap \xi_y \in < -1; 1 > \quad (13)$$

Parametr  $\xi_x$ , służy do skalowania prędkości, natomiast  $\xi_y$  odpowiada za skalowanie momentu napędowe-

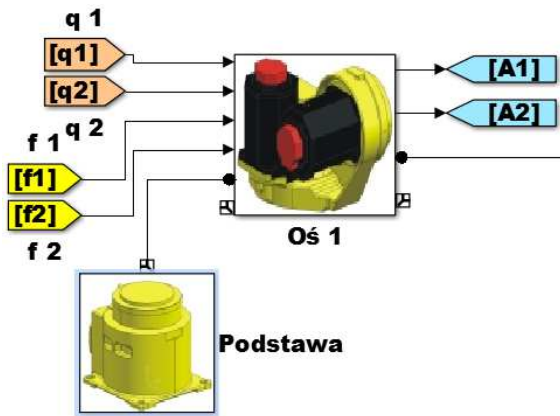
go. Mapę pasywnych strat dostosowano do indywidualnych mocy kolejnych silników robota, podstawiając wyznaczone wartości w odpowiadające im miejsca, na wykresach rozpiętych między zerowym i maksymalnym momentem oraz prędkością danego silnika. Wynikiem sumowania pasywnych oraz aktywnych strat mocy była mapa całkowitych strat mocy silników oraz energoelektroniki robota (14), (rys. 6).

$$MCSM_i(\tau_i^d, \dot{q}_i^d) = MPMSM_i(\xi_x, \xi_y) + MASM_i(\tau_i^d, \dot{q}_i^d) \quad (14)$$

Opracowane charakterystyki zastosowano do obliczeń poboru energii elektrycznej w napędach robota, za pomocą komputerowych symulacji jego pracy.

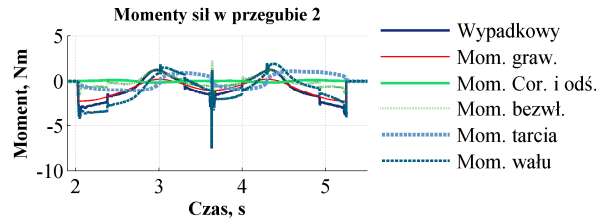
### 3. EKSPERYMENT NUMERYCZNY

Na podstawie analizy budowy badanej maszyny, wykonano jej model numeryczny w postaci schematu blokowego. Model wyposażono w system programowania off-line, interpolator liniowy [4], system generowania profili prędkości przejazdu [5], system kinematyki odwrotnej [6], kaskadowy układ sterowania nadążnego z pętlą sprzężenia zwrotnego oraz z pętlą sprzężenia w przód. Opisane systemy odpowiadają za obliczanie wartości momentów napędowych, które muszą być rozwijane przez napędy modelu numerycznego robota. Napędy napędzają model numeryczny robota, który zawiera informacje o wartościach wcześniej zidentyfikowanych parametrów geometrycznych oraz dynamicznych (rys. 7) i przełożenia przekładni mechanicznych.

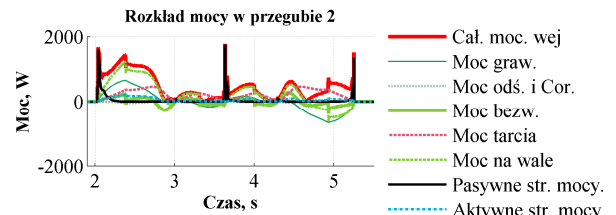


Rys. 7. Model numeryczny połączenia członów robota Fanuc AM100iB

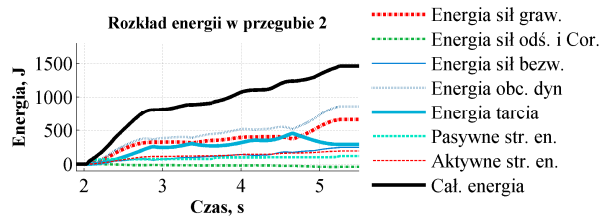
Opracowany model robota umożliwia wykonywanie zautomatyzowanych analiz rozkładu całkowitych oraz cząstkowych momentów napędowych (rys. 8) [7] oraz analiz dystrybucji mocy (rys. 9) i energii (rys. 10) między wszystkie przeguby robota [8].



Rys. 8. Wartości wszystkich rodzajów obciążeń działających na wał drugiego napędu modelu numerycznego robota Fanuc AM100iB



Rys. 9. Wartości wszystkich rodzajów mocy i jej strat z jakimi wykonywana była praca przez drugi napęd modelu numerycznego robota Fanuc AM100iB



Rys. 10. Wartości wszystkich rodzajów energii i jej strat zużytych na wykonanie pracy przez drugi napęd modelu numerycznego robota Fanuc AM100iB

Przedstawione wyniki eksperymentów numerycznych szczegółowo opisano w pracy dotyczącej analizy energochłonności procesów technologicznych transportu i manipulacji [8]. Zgodnie z uzyskanymi wynikami analizy energochłonności, straty mocy są czynnikiem, które w bardzo dużym stopniu wpływają na ilość pobranej energii, pomimo faktu stosowania w robotyce silników o bardzo wysokiej sprawności elektrotechnicznej. Wynika to z faktu występowania strat pasywnych, które osiągają bardzo duże wartości w sytuacji, gdy robot pracuje z niską wydajnością lub gdy jedno z ramion robota pracuje z relatywnie niską prędkością kątową.

### 4. PODSUMOWANIE ORAZ WNIOSKI

W pracy przedstawiono rozważania dotyczące techniki modelowania wartości strat mocy w silnikach elektrycznych oraz zasilających je systemów energoelektrycznych. Zwrócono uwagę na brak wyników badań ilości emisji ciepła z badanych obiektów, pracujących w stanie statycznym oraz na biegu jałowym. Wykazano że klasyczny bilans energetyczny oraz wyrażenie na wartość sprawności elektrotechnicznej są niewystarczające do

pełnego opisu wartości strat mocy. W związku z tym zaproponowano rozwiązanie polegające na wprowadzeniu różnicy między klasycznymi stratami mocy oraz stratami mocy, generowanymi podczas pracy silników w stanie zwarcia, nazwanymi odpowiednio aktywnymi i pasywnymi. Dzięki temu podejściu, uzyskane wyniki nie są sprzeczne z klasycznym bilansem energetycznym oraz z

wyrażeniem na wartość sprawności elektrotechnicznej. W ramach dalszych prac badawczych, proponuje się przeprowadzenie szczegółowej identyfikacji parametrów sporządzonych map strat mocy oraz ich doświadczalną weryfikację a także identyfikację parametrów dynamicznych członów robota i rekonstrukcję parametrów tarcia wiskotycznego w jego przegubach.

## Literatura

---

1. Millo F., Ronaldo L., Andreato M.: Numerical simulation for vehicle power train development. Chapter 24. In: Numerical Analysis - Theory and Application. Ed. J. Awrejcewicz. Publisher:InTech 2011, Sep. 9.
2. Melo P., Castro R., Araujo R.E.: Evaluation of an energy loss-minimization algorithm for EVs based on induction motor. Chapter 17. In: Induction Motors - Modelling and Control. Ed. R. E. Araújo. Publisher: InTech 2012, Nov. 14.
3. Olszewski M.: Evaluation of 2004 Toyota Prius Hybrid Electric Drive System. U.S. Department of Energy FreedomCAR and Vehicle Technologies. Washington 2005.
4. Świder J., Zbilski A.: Liniowy interpolator wirtualnego modelu robota FANUC AM100iB. „Modelowanie Inżynierskie” 2011, nr 42, t. 11, s. 419 - 425.
5. Świder J., Zbilski A.: The interactive driving profile generation system. “Applied Mechanics and Materials” 2013, t. 307, p. 66-74.
6. Świder J., Zbilski A.: Wektorowo-punktowa metoda rozwiązywania odwrotnego zadania kinematyki robota Fanuc AM100iB. „Modelowanie Inżynierskie” 2011, nr 42, t. 11, s. 427 - 432.
7. Świder J., Zbilski A.: The modeling and analysis of a partial loads in the FANUC AM100iB robot joints. „Machining Science and Technology” 2013 (zgłoszony do druku).
8. Świder J., Zbilski A.: Energy intensity analysis and costs of Fanuc AM100iB robot work. BINDT's conference proceedings, Kraków 2013 (zgłoszony do druku).