

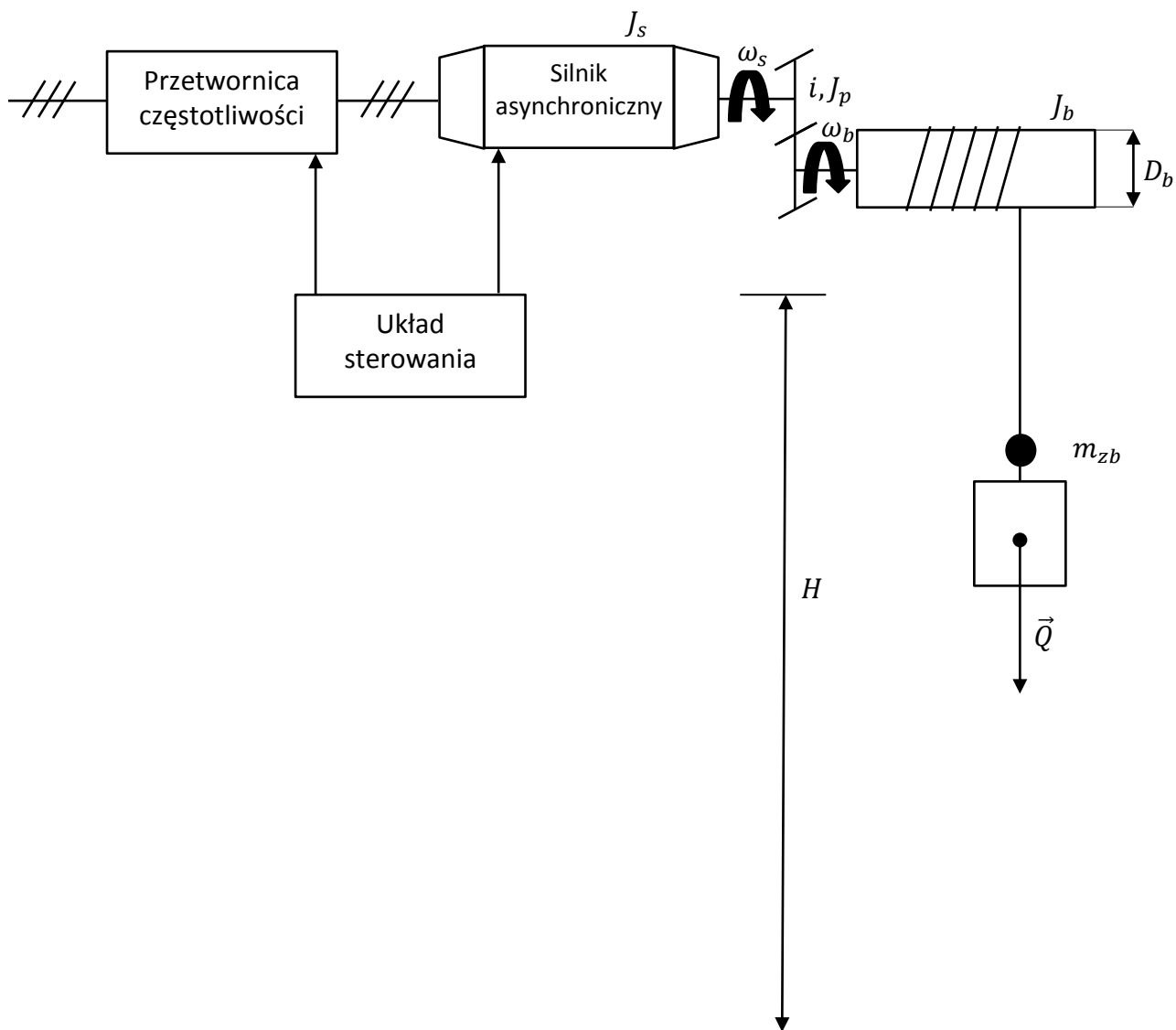
Sterowanie napędem elektrycznym.

Projekt mechanizmu podnoszenia
windy.

<http://www.mbmaster.pl>

Marek Bryczyński

<http://www.mbmaster.pl>



Rysunek 1. Schemat układu windy.

Dla układu dźwigu przedstawionego na rysunku powyżej dobrane zostaną elementy niezbędne do poprawnej pracy urządzenia. Układ posiada parametry zadane jakimi są wartości prędkości oraz przyspieszeń z jakimi będzie poruszała się winda w ruchu pionowym. Znane są wszystkie parametry elementów mechanicznych.

Celem projektu jest wyznaczenie obciążeń statycznych i dynamicznych jakie pojawią się w trakcie pracy windy. W oparciu wyznaczone wartości momentów statycznych i dynamicznych dobrany do układu zostanie silnik asynchroniczny trójfazowy. Do silnika dobrana zostanie przetwornica częstotliwości wraz z rezystorem hamującym.

Parametry zadane dźwigu:

$$Q = 95[kN]$$

$$m_{zb} = 470[kg] - \text{masa zblocza}$$

$$v = 23 \left[\frac{m}{min} \right] = \frac{23}{60} \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$a_r = 0,12 \left[\frac{m}{s^2} \right] - \text{przyśpieszenie rozruch}$$

$$a_h = -0,12 \left[\frac{m}{s^2} \right] - \text{przyśpieszenie hamowanie}$$

$$H = 10[m]$$

$$D_b = 0,5[m]$$

$$i = 25[-]$$

$$i_c = 2[-]$$

$$\eta = 0,93[-]$$

$$J_b = 60[kg \cdot m^2]$$

$$J_p = 1[kg \cdot m^2]$$

$$J_s = 0,87[kg \cdot m^2]$$

$$g = 9,81 \left[\frac{m}{s^2} \right] - \text{nateżenie pola grawitacyjnego przy powierzchni Ziemi}$$

$$g = G \cdot \frac{M}{r^2}$$

Pełne nazwy wielkości stosowanych w obliczeniach:

T – czas cyklu

t_{pr} – czas podnoszenie – rozruch

t_{pu} – czas podnoszenie – ustalony

t_{ph} – czas podnoszenie – hamowanie

t_{or} – czas opuszczanie – rozruch

t_{ou} – czas opuszczanie – ustalony

t_{oh} – czas opuszczanie – hamowanie

s_{pr} – droga podnoszenie rozruch (ruch jednostajnie przyśpieszony)

s_{pu} – droga podnoszenie stała prędkość (ruch jednostajny)

s_{ph} – droga podnoszenie hamowanie (ruch jednostajnie opóźniony)

s_{or} – droga opuszczanie rozruch (ruch jednostajnie przyśpieszony)

s_{ou} – droga opuszczanie stała prędkość (ruch jednostajny)

s_{oh} – droga opuszczanie hamowanie (ruch jednostajnie opóźniony)

M_{mp} – moment statyczny siły obciążającej przy podnoszeniu

M_{mo} – moment statyczny siły obciążającej przy opuszczaniu

M_{pr} – moment podnoszenie rozruch
 M_{ph} – moment podnoszenie hamowanie
 M_{or} – moment opuszczanie rozruch
 M_{oh} – moment opuszczanie hamowanie
 M_{dpr} – moment dynamiczny podnoszenie rozruch
 M_{dph} – moment dynamiczny podnoszenie hamowanie
 M_{dor} – moment dynamiczny opuszczanie rozruch
 M_{doh} – moment dynamiczny opuszczanie hamowanie

J_p – moment bezwładności wirujących mas bębna i liny
 J_b – moment bezwładności wirujących mas przekładni i sprzęgła
 J_s – moment bezwładności wirujących mas wirnika silnika
 J_{zp} – zastępczy moment bezwładności sprowadzony na wał wirnika podczas podnoszenia
 J_{zo} – zastępczy moment bezwładności sprowadzony na wał wirnika podczas opuszczania

$$v = v_0 + a \cdot t$$

$$s = v_0 \cdot t + a \cdot t^2 / 2$$

$$v_0 = 0$$

$$t = v/a$$

$$t_{pr} = t_{ph} = t_{or} = t_{oh} = v/a_r$$

$$s_{pr} = s_{ph} = s_{or} = s_{oh} = a_r \cdot (t_{pr})^2 / 2$$

Obliczenia czasów i prędkości:

$$v_0 = 0$$

$$v = v_0 + a \cdot t$$

$$V = 23 \text{ [m/min]} = 23/60 \text{ [m/s]} = 0,38(3) \text{ [m/s]}$$

$$t_{pr} = t_{ph} = t_{or} = t_{oh} = v/a_r$$

$$t_{pr} = (23/60)/0,12 = 3,19 \text{ [m/s/m/s}^2\text{]} = \text{[s]}$$

$$\underline{t_{pr} = 3,19 \text{ [s]}}$$

$$s = v_0 \cdot t + a \cdot t^2 / 2$$

$$s_{pr} = a_r \cdot (t_{pr})^2 / 2 = 1/2 \cdot 0,12 \cdot (3,19)^2 = 0,61 \text{ [m]}$$

$$\underline{s_{pr} = 0,61 \text{ [m]}}$$

$$s_{pu} = s_{ou} = H - 2 \cdot s_{pr}$$

$$s_{pu} = 10 - 2 \cdot 0,61 = 8,78 \text{ [m]}$$

$$\underline{s_{pu} = 8,78 \text{ [m]}}$$

$$t_{pu} = t_{ou} = s_{pu}/v$$

$$t_{pu} = 8,78 / (23/60) = 22,9 \text{ [s]}$$

$$\underline{t_{pu} = 22,9 \text{ [s]}}$$

$$T = 4 * t_{pr} + 2 * t_{pu} + 0,6 * T$$

$$T = 2,5 * (4 * t_{pr} + 2 * t_{pu})$$

$$T = 2,5 * (4 * 3,19 + 2 * 22,9) = 146,4 \text{ [s]}$$

$$\underline{T = 146,4 \text{ [s]}}$$

$$\mathbf{v = \omega \times R}$$

$$v = \omega * R * \sin \angle(\omega, R)$$

$$\omega_b = V / (D_b / 2) * i_c \text{ [rad/s]}$$

$$\omega_b = (23/60) / (0,5/2) * 2 = 3,1 \text{ [rad/s]}$$

$$\underline{\omega_b = 3,1 \text{ [rad/s]}}$$

$$\omega_s = \omega_b * i \text{ [rad/s]}$$

$$\omega_s = 3,1 * 25 = 77,5 \text{ [rad/s]}$$

$$\underline{\omega_s = 77,5 \text{ [rad/s]}}$$

$$n_s = 60 / (2 * \pi) * \omega_s \text{ [obr/min]}$$

$$n_s = 30 / \pi * 77,5 = 740 \text{ [obr/min]}$$

$$\underline{n_s = 740 \text{ [obr/min]}}$$

Obliczenia momentów sił obciążających i masowych momentów bezwładności:

$$M_{mp} = (Q + m_{zb} * g) * D_b / (\eta * 2 * i_c * i) \text{ [Nm]}$$

$$M_{mp} = (95000 + 470 * 9,81) * 0,5 / (0,93 * 2 * 2 * 25) = 535,54 \text{ [Nm]}$$

$$\underline{M_{mp} = 536 \text{ [Nm]}}$$

$$M_{mo} = \eta * (Q + m_{zb} * g) * D_b / (2 * i_c * i) \text{ [Nm]}$$

$$M_{mo} = 0,93 * (95000 + 470 * 9,81) * 0,5 / (2 * 2 * 25) = 463,18 \text{ [Nm]}$$

$$\underline{M_{mo} = 463 \text{ [Nm]}}$$

$$P = M * \omega \text{ [W]}$$

Wstępne dobranie silnika. Przyjęto założenie $M_{sN} = 0,7 * M_{mp}$.

$$M_{sN} = M_{mp} * 0,7 \text{ [Nm]}$$

$$M_{sN} = 536 * 0,7 = 375,2 \text{ [Nm]}$$

$$M_{sN} = 375,2 \text{ [Nm]}$$

$$P_N = M_{sN} \cdot \omega_s \text{ [W]}$$

$$P_N = 375,2 \cdot 77,5 = 29078 \text{ [W]}$$

$$\underline{P_N = 30 \text{ [kW]}}$$

$$J_{zp} = [J_b + (Q/g + m_{zb}) \cdot D_b^2 / (4 \cdot i_c^2)] / (\eta \cdot i^2) + J_p + J_s \text{ [kg} \cdot \text{m}^2]$$

$$J_{zp} = [60 + (95000/9,81 + 470) \cdot 0,5^2 / (4 \cdot 2^2)] / (0,93 \cdot 25^2) + 1 + 0,87 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2]$$

$$J_{zp} = [60 + (10154) \cdot 0,25/16] / (0,93 \cdot 25^2) + 1 + 0,87 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2]$$

$$J_{zp} = 218,66 / (0,93 \cdot 25^2) + 1 + 0,87 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2]$$

$$J_{zp} = 0,38 + 1 + 0,87 = 2,25 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2]$$

$$\underline{J_{zp} = 2,25 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2]}$$

$$J_{zo} = \eta \cdot [J_b + (Q/g + m_{zb}) \cdot D_b^2 / (4 \cdot i_c^2)] / (i^2) + J_p + J_s \text{ [kg} \cdot \text{m}^2]$$

$$J_{zo} = 0,93 \cdot [60 + (95000/9,81 + 470) \cdot 0,5^2 / (4 \cdot 2^2)] / (25^2) + 1 + 0,87 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2]$$

$$J_{zo} = 0,93 \cdot [60 + (10154) \cdot 0,25/16] / (25^2) + 1 + 0,87 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2]$$

$$J_{zo} = 0,93 \cdot 218,66 / (25^2) + 1 + 0,87 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2]$$

$$J_{zo} = 0,33 + 1 + 0,87 = 2,2 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2]$$

$$\underline{J_{zo} = 2,2 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2]}$$

$$\mathbf{M = J \cdot \epsilon}$$

$$\mathbf{M = J \cdot d\omega_m^r / dt}$$

$$\mathbf{M = J \cdot d\omega_m^r / dt \text{ [Nm]}}$$

$$M_{dpr} = J_{zp} \cdot d\omega_m^r / dt \text{ [Nm]}$$

$$M_{dpr} = J_{zp} \cdot (\omega_s - 0) / (t_{pr} - 0) \text{ [Nm]}$$

$$M_{dpr} = 2,25 \cdot (77,5 - 0) / (3,19 - 0) = 54,7 \text{ [Nm]}$$

$$\underline{M_{dpr} = 54,7 \text{ [Nm]}}$$

$$M_{dph} = J_{zp} \cdot d\omega_m^r / dt \text{ [Nm]}$$

$$M_{dph} = J_{zp} \cdot (0 - \omega_s) / (t_{ph} - 0) \text{ [Nm]}$$

$$M_{dph} = 2,25 \cdot (0 - 77,5) / (3,19 - 0) = -54,7 \text{ [Nm]}$$

$$\underline{M_{dph} = -54,7 \text{ [Nm]}}$$

$$M_{dor} = J_{zo} \cdot d\omega_m^r / dt \text{ [Nm]}$$

$$M_{dor} = J_{zo} \cdot (-\omega_s - 0) / (t_{or} - 0) \text{ [Nm]}$$

$$M_{dor} = 2,2 \cdot (-77,5 - 0) / (3,19 - 0) = -53,4 \text{ [Nm]}$$

$$\underline{M_{dor} = -53,4 \text{ [Nm]}}$$

$$M_{doh} = J_{zo} \cdot d\omega_m^r / dt \text{ [Nm]}$$

$$M_{doh} = J_{zo} * (0 - (-\omega_s)) / (t_{oh} - 0) \text{ [Nm]}$$
$$M_{doh} = 2,2 * (0 - (-77,5)) / (3,19 - 0) = 53,4 \text{ [Nm]}$$

$$\underline{M_{doh} = 53,4 \text{ [Nm]}}$$

$$M_{pr} = M_{mp} + M_{dpr} \text{ [Nm]}$$
$$M_{pr} = 536 + 54,7 = 590,7 \text{ [Nm]}$$

$$\underline{M_{pr} = 590,7 \text{ [Nm]}}$$

$$M_{pu} = M_{mp} = 536 \text{ [Nm]}$$

$$\underline{M_{pu} = 536 \text{ [Nm]}}$$

$$M_{ph} = M_{mp} + M_{dph} \text{ [Nm]}$$
$$M_{ph} = 536 - 54,7 = 481,3 \text{ [Nm]}$$

$$\underline{M_{ph} = 481,3 \text{ [Nm]}}$$

$$M_{or} = M_{mo} + M_{dor} \text{ [Nm]}$$
$$M_{or} = 463 - 53,4 = 409,6 \text{ [Nm]}$$
$$\underline{M_{or} = 409,6 \text{ [Nm]}}$$

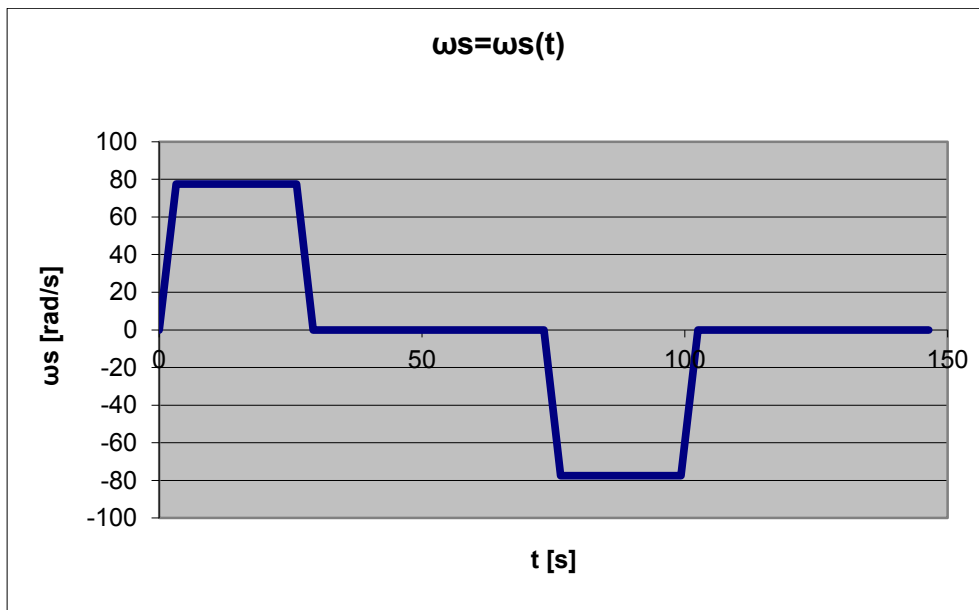
$$M_{ou} = M_{mo} = 463 \text{ [Nm]}$$

$$\underline{M_{ou} = 463 \text{ [Nm]}}$$

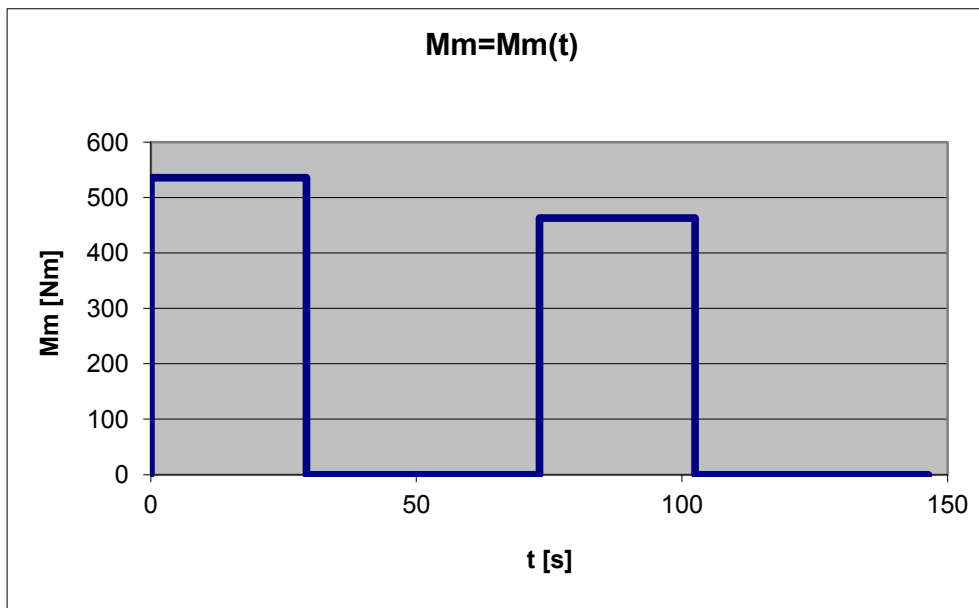
$$M_{oh} = M_{mo} + M_{doh} \text{ [Nm]}$$
$$M_{oh} = 463 + 53,4 = 516,4 \text{ [Nm]}$$

$$\underline{M_{oh} = 516,4 \text{ [Nm]}}$$

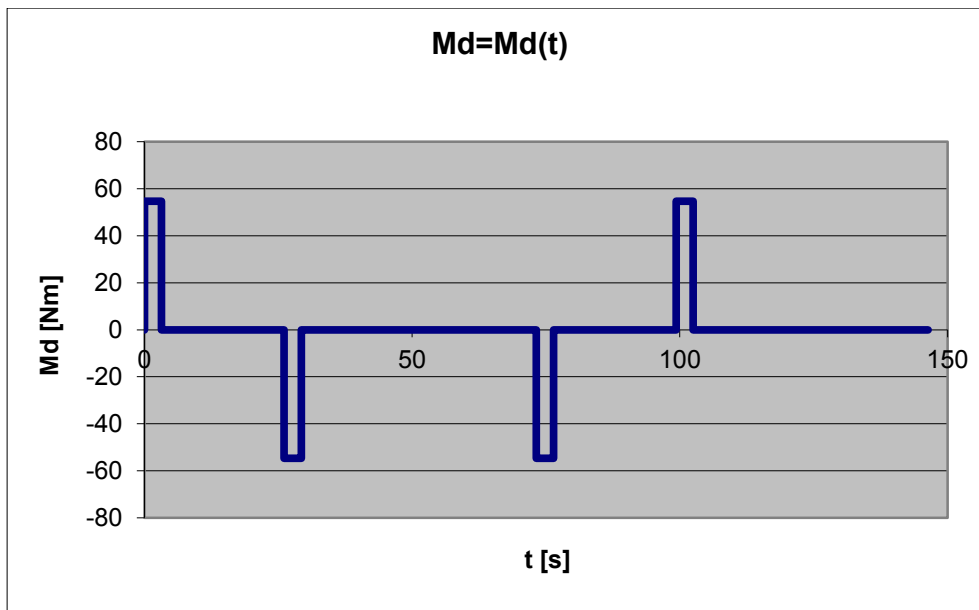
Charakterystyki zmian wielkości mechanicznych napędu:



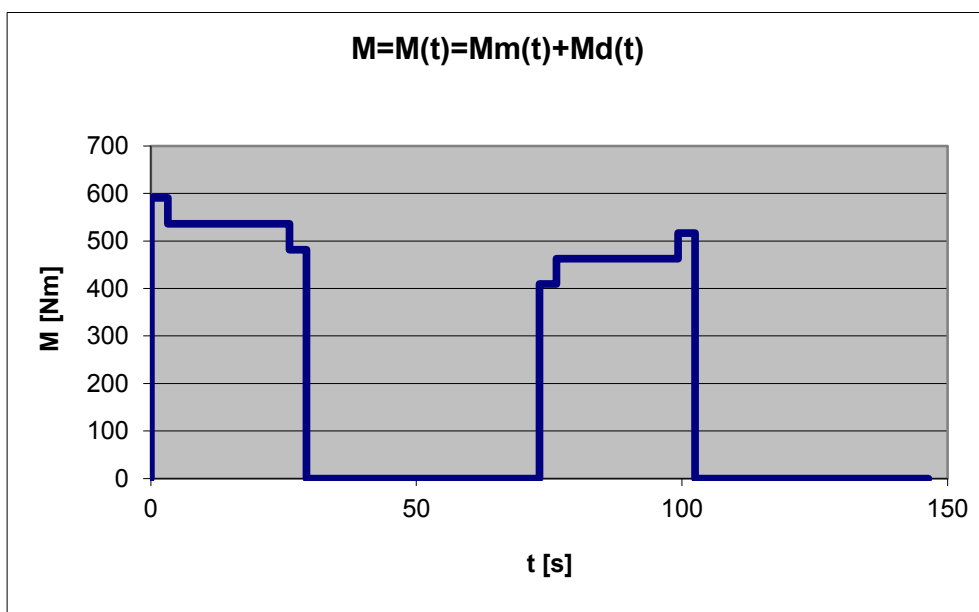
Rysunek 2. Prędkość kątowna wału silnika $\omega_s = \omega_s(t)$.



Rysunek 3. Moment statyczny sprowadzony na wał silnika $M_m = M_m(t)$.



Rysunek 4. Moment dynamiczny sprowadzony na wał silnika $M_d=M_d(t)$.



Rysunek 5. Moment całkowity sprowadzony na wał silnika $M=M(t)=M_d(t)+ M_m(t)$.

Obliczenie momentu zastępczego:

$$M_z = [(\sum M_x^2 \cdot t_x) / T]^{1/2} \text{ [Nm]}$$

$$M_z = [(M_{pr}^2 \cdot t_{pr} + M_{mp}^2 \cdot t_{pu} + M_{ph}^2 \cdot t_{ph} + M_{or}^2 \cdot t_{or} + M_{mo}^2 \cdot t_{ou} + M_{oh}^2 \cdot t_{oh}) / (\beta \cdot 0,6 \cdot T + \alpha \cdot 4 \cdot t_{pr} + 2 \cdot t_{pu})]^{1/2} \text{ [Nm]}$$

$\beta = 0,5$ [-] – współczynnik uwzględniający pogorszenie warunków odprowadzania ciepła podczas postoju

$$\alpha = (1 + \beta) / 2 \text{ [-]}$$

$\alpha = 0,75 [-]$ – współczynnik uwzględniający pogorszenie warunków chłodzenia podczas rozruchu i hamowania

$$M_z = [(590,7^2 \cdot 3,19 + 536^2 \cdot 22,9 + 481,3^2 \cdot 3,19 + 409,6^2 \cdot 3,19 + 463^2 \cdot 22,9 + 516,4^2 \cdot 3,19) / (0,5 \cdot 0,6 \cdot 146,4 + 0,75 \cdot 4 \cdot 3,19 + 2 \cdot 22,9)]^{1/2} \text{ [Nm]}$$

$$M_z = [(1113076 + 6579079 + 738963 + 535193 + 4909050 + 850674) / (43,92 + 9,57 + 45,8)]^{1/2} \text{ [Nm]}$$

$$M_z = (14726035 / 99,29)^{1/2} = 385 \text{ [Nm]}$$

$$\underline{M_z = 385 \text{ [Nm]}}$$

Porównanie obliczonych parametrów z parametrami silnika CELMA 2Sg 225M8z:

$$n_N = 737 \text{ [obr/min]} \leftrightarrow n_s = 740 \text{ [obr/min]}$$

$$M_N = 389 \text{ [Nm]} \leftrightarrow M_z = 385 \text{ [Nm]}$$

$$M_{\max} = 894,7 \text{ [Nm]} \leftrightarrow M_{pr} = 590,7 \text{ [Nm]}$$

Obliczenie krytycznego momentu znamionowego w oparciu o dane katalogowe oraz o założenie $M_k = M_{kN}$ w całym zakresie regulacji prędkości:

$$M_{kN} = p_{MN} \cdot M_N = 2,3 \cdot 389 = 894,7 \text{ [Nm]}$$

$$\underline{M_{kN} = 894,7 \text{ [Nm]}}$$

$$n = 60 \cdot f / p_b \text{ [obr/min]}$$

$$s_N = (n_s - n_N) / n_s [-]$$

$$s_N = (750 - 737) / 750 = 0,017(3) [-]$$

$$\underline{s_N = 0,017(3) [-]}$$

Uproszczony wzór Klossa:

$$M_x = 2 \cdot M_{kN} / (s_x / s_N + s_N / s_x)$$

$$M_N = 2 \cdot M_{kN} / (s_{kN} / s_N + s_N / s_{kN}) \text{ [Nm]}$$

Rozwiązanie dla pracy silnikowej:

$$s_{kN} = s_N \cdot [M_{kN} / M_N + ((M_{kN} / M_N)^2 - 1)^{1/2}] [-]$$

$$s_{kN} = 0,017(3) \cdot [894,7 / 389 + ((894,7 / 389)^2 - 1)^{1/2}] = 0,076 [-]$$

$$s_{kN} = 0,076 [-]$$

Obliczenia poślizgów dla kolejnych etapów pracy:

$$s_x = s_{kN} \cdot [M_{kN} / M_x - ((M_{kN} / M_N)^2 - 1)^{1/2}] [-]$$

$$s_{pr} = s_{kN} \cdot [M_{kN} / M_{pr} - ((M_{kN} / M_{pr})^2 - 1)^{1/2}] [-]$$

$$s_{pr} = 0,076 \cdot [894,7 / 590,7 - ((894,7 / 590,7)^2 - 1)^{1/2}] = 0,029 [-]$$

$$\underline{s_{pr} = 0,029 [-]}$$

$$S_{pu} = S_{kN} * [M_{kN}/M_{pu} - ((M_{kN}/M_{pu})^2 - 1)^{1/2}] [-]$$

$$S_{pu} = 0,076 * [894,7/536 - ((894,7/536)^2 - 1)^{1/2}] = 0,025 [-]$$

$$\underline{S_{pu} = 0,025 [-]}$$

$$S_{ph} = S_{kN} * [M_{kN}/M_{ph} - ((M_{kN}/M_{ph})^2 - 1)^{1/2}] [-]$$

$$S_{ph} = 0,076 * [894,7/481,3 - ((894,7/481,3)^2 - 1)^{1/2}] = 0,022 [-]$$

$$\underline{S_{ph} = 0,022 [-]}$$

$$S_{or} = S_{kN} * [M_{kN}/M_{or} - ((M_{kN}/M_{or})^2 - 1)^{1/2}] [-]$$

$$S_{or} = 0,076 * [894,7/409,6 - ((894,7/409,6)^2 - 1)^{1/2}] = 0,018 [-]$$

$$\underline{S_{or} = 0,018 [-]}$$

$$S_{ou} = S_{kN} * [M_{kN}/M_{ou} - ((M_{kN}/M_{ou})^2 - 1)^{1/2}] [-]$$

$$S_{ou} = 0,076 * [894,7/463 - ((894,7/463)^2 - 1)^{1/2}] = 0,021 [-]$$

$$\underline{S_{ou} = 0,021 [-]}$$

$$S_{oh} = S_{kN} * [M_{kN}/M_{oh} - ((M_{kN}/M_{oh})^2 - 1)^{1/2}] [-]$$

$$S_{oh} = 0,076 * [894,7/516,4 - ((894,7/516,4)^2 - 1)^{1/2}] = 0,024 [-]$$

$$\underline{S_{oh} = 0,024 [-]}$$

Obliczenie rezystancji rozproszenia wirnika przy założeniu ($R_s = R_r'$; $X_{s\sigma} = X_{r\sigma}'$; $U_{sf} = 400V$ ponieważ uzwojenia silnika połączone w trójkąt):

$$S_{kN} = R_r' / [R_s^2 + (X_{s\sigma} + X_{r\sigma}')^2]^{1/2}$$

$$M_{kN} = 3/2 * U_{sf}^2 / [\omega_s * [R_s^2 + (X_{s\sigma} + X_{r\sigma}')^2]^{1/2}]$$

$$[R_s^2 + (X_{s\sigma} + X_{r\sigma}')^2]^{1/2} = 3/2 * U_{sf}^2 / (\omega_s * M_{kN})$$

$$[R_s^2 + (X_{s\sigma} + X_{r\sigma}')^2]^{1/2} = 3/2 * 400^2 / (77,5 * 894,7) = 3,46 [\Omega]$$

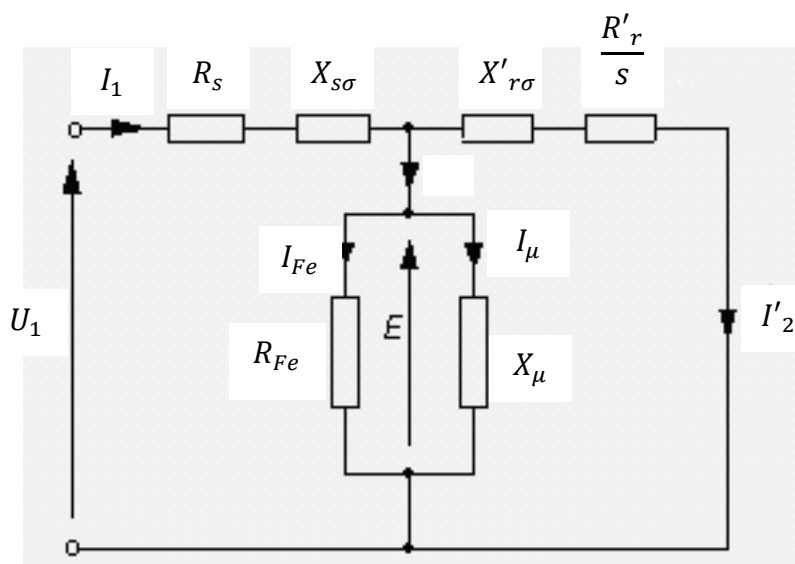
$$R_r' = S_{kN} * [R_s^2 + (X_{s\sigma} + X_{r\sigma}')^2]^{1/2} = 0,076 * 3,46 = 0,263 [\Omega]$$

$$\underline{R_r' = R_s = 0,263 [\Omega]}$$

$$X_{s\sigma} = 1/2 * [(R_r'/S_{kN})^2 - R_s^2]^{1/2}$$

$$X_{s\sigma} = 1/2 * [(0,263/0,076)^2 - 0,263^2]^{1/2} = 1,73 [\Omega]$$

$$\underline{X_{s\sigma} = X_{r\sigma}' = 1,73 [\Omega]}$$



Rysunek 6. Schemat fazowy silnika.

Na rysunku powyżej przedstawiony jest modelowy schemat jednej fazy silnika indukcyjnego. Oznaczenia użyte w schemacie mają następujące znaczenie:

U_1 – napięcie zasilania fazy silnika

E – siła elektromotoryczna indukowana w stojanie

I_1 – prąd jednej fazy silnika

I'_2 – prąd wirnika sprowadzony na stojan

I_μ – prąd magnesujący

I_{Fe} – prąd strat w żelazie

R_s – rezystancja stojana

$X_{s\sigma}$ – reaktancja rozproszenia stojana

$X'_{r\sigma}$ – reaktancja rozproszenia wirnika sprowadzona na stojan

R'_r – rezystancja wirnika sprowadzona na stojan

s – poślizg wirnika względem wirującego pola stojana

Poślizg definiowany jest jako:

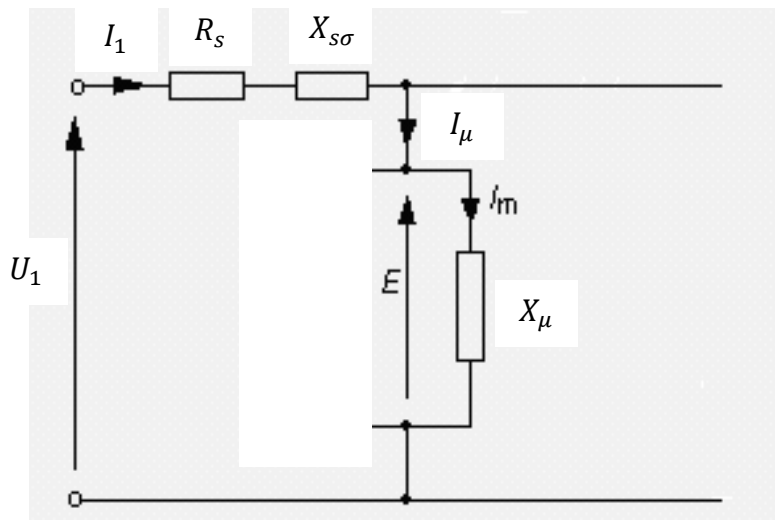
$$s = \frac{n_0 - n}{n_0}; \text{ gdzie}$$

n_0 – prędkość obrotowa wirującego pola w stojanie $\left[\frac{\text{obr}}{\text{min}}\right]$

n – prędkość obrotowa wirnika $\left[\frac{\text{obr}}{\text{min}}\right]$

W obliczeniach przeprowadzanych w tym projekcie całkowicie pominiemy straty w żelazie, przyjmujemy $R_{Fe} = 0$.

Obliczenie prądu biegu jałowego oraz reaktancji X_μ przy założeniu ($s = 0$), oznacza to możliwość pominięcia (R_r'/s) $\rightarrow \infty$. Efektem tego założenia będzie uproszczenie się schematu do postaci:



Rysunek 7. Uproszczony schemat fazowy silnika dla poślizgu $s=0$.

$$I_0 = i_\% \cdot I_N$$

$i_\%$ - stosunek I_0/I_N odczytany z poradnika inżyniera elektryka dla silnika 30kW, $p_b = 4 \Rightarrow i_\% = 0,4 [-]$; $I_N = 64 [A]$

$$I_0 = i_\% \cdot I_{sN} = 0,4 \cdot 64 = 25,6 [A]$$

$$\underline{I_0 = 25,6 [A]}$$

$$I_0 = U_{sf} / [R_s^2 + (X_{s\sigma} + X_\mu)^2]^{1/2}$$

$$X_\mu = [(U_{sf}/I_0)^2 - R_s^2]^{1/2} - X_{s\sigma}$$

$$X_\mu = [(400/25,6)^2 - 0,263^2]^{1/2} - 1,73 = 13,89 [\Omega]$$

$$\underline{X_\mu = 13,89 [\Omega]}$$

Obliczenie prądu magnesownia $I_{\mu N}$:

$$I_{\mu N} = I_{sN} \cdot [X_{r\sigma}'^2 \cdot s_N^2 + R_r'^2 / ((X_{r\sigma}' + X_\mu)^2 \cdot s_N^2 + R_r'^2)]^{1/2}$$

$$I_{\mu N} = 64 \cdot [1,73^2 \cdot 0,0173^2 + 0,263^2 / ((1,73 + 13,89)^2 \cdot 0,0173^2 + 0,263^2)]^{1/2} = 44,93 [A]$$

$$\underline{I_{\mu N} = 44,93 [A]}$$

Obliczenia prądów kolejnych cykli pracy dźwignicy przy założeniu $I_\mu = I_{\mu N}$:

$$I_x = I_{\mu N} \cdot [((X_{r\sigma}' + X_\mu)^2 \cdot s_x^2 + R_r'^2) / (X_{r\sigma}'^2 \cdot s_x^2 + R_r'^2)]^{1/2}$$

$$I_{pr} = I_{\mu N} \cdot [((X_{r\sigma}' + X_\mu)^2 \cdot s_{pr}^2 + R_r'^2) / (X_{r\sigma}'^2 \cdot s_{pr}^2 + R_r'^2)]^{1/2}$$

$$I_{pr} = 44,93 \cdot [((1,73 + 13,89)^2 \cdot 0,029^2 + 0,263^2) / (1,73^2 \cdot 0,029^2 + 0,263^2)]^{1/2} = 87,9 [A]$$

$$\underline{I_{pr} = 87,9 \text{ [A]}}$$

$$I_{pu} = I_{\mu N} * [((X_{r\sigma}' + X_{\mu})^2 * S_{pu}^2 + R_r'^2) / (X_{r\sigma}'^2 * S_{pu}^2 + R_r'^2)]^{1/2}$$

$$I_{pu} = 44,93 * [(15,62^2 * 0,025^2 + 0,263^2) / (1,73^2 * 0,025^2 + 0,263^2)]^{1/2} = 79,37 \text{ [A]}$$

$$\underline{I_{pu} = 79,37 \text{ [A]}}$$

$$I_{ph} = I_{\mu N} * [((X_{r\sigma}' + X_{\mu})^2 * S_{ph}^2 + R_r'^2) / (X_{r\sigma}'^2 * S_{ph}^2 + R_r'^2)]^{1/2}$$

$$I_{ph} = 44,93 * [(15,62^2 * 0,022^2 + 0,263^2) / (1,73^2 * 0,022^2 + 0,263^2)]^{1/2} = 73,16 \text{ [A]}$$

$$\underline{I_{ph} = 73,16 \text{ [A]}}$$

$$I_{or} = I_{\mu N} * [((X_{r\sigma}' + X_{\mu})^2 * S_{or}^2 + R_r'^2) / (X_{r\sigma}'^2 * S_{or}^2 + R_r'^2)]^{1/2}$$

$$I_{or} = 44,93 * [(15,62^2 * 0,018^2 + 0,263^2) / (1,73^2 * 0,018^2 + 0,263^2)]^{1/2} = 65,31 \text{ [A]}$$

$$\underline{I_{or} = 65,31 \text{ [A]}}$$

$$I_{ou} = I_{\mu N} * [((X_{r\sigma}' + X_{\mu})^2 * S_{ou}^2 + R_r'^2) / (X_{r\sigma}'^2 * S_{ou}^2 + R_r'^2)]^{1/2}$$

$$I_{ou} = 44,93 * [(15,62^2 * 0,021^2 + 0,263^2) / (1,73^2 * 0,021^2 + 0,263^2)]^{1/2} = 71,15 \text{ [A]}$$

$$\underline{I_{ou} = 71,15 \text{ [A]}}$$

$$I_{oh} = I_{\mu N} * [((X_{r\sigma}' + X_{\mu})^2 * S_{oh}^2 + R_r'^2) / (X_{r\sigma}'^2 * S_{oh}^2 + R_r'^2)]^{1/2}$$

$$I_{oh} = 44,93 * [(15,62^2 * 0,024^2 + 0,263^2) / (1,73^2 * 0,024^2 + 0,263^2)]^{1/2} = 77,27 \text{ [A]}$$

$$\underline{I_{oh} = 77,27 \text{ [A]}}$$

$$I_z = [(\sum I_x^2 * t_x) / T]^{1/2}$$

$$I_z = [(I_{pr}^2 * t_{pr} + I_{pu}^2 * t_{pu} + I_{ph}^2 * t_{ph} + I_{or}^2 * t_{or} + I_{ou}^2 * t_{ou} + I_{oh}^2 * t_{oh}) / T]^{1/2}$$

$$I_z = [(87,9^2 * 3,19 + 79,37^2 * 22,9 + 73,16^2 * 3,19 + 65,31^2 * 3,19 + 71,15^2 * 22,9 + 77,27^2 * 3,19) / 58,56]^{1/2}$$

$$I_z = [(334562,3085) / 58,56]^{1/2} = 75,59 \text{ [A]}$$

$$\underline{I_z = 75,59 \text{ [A]}}$$

Dobór przetwornicy częstotliwości i rezystora do rozpraszania energii podczas hamowania.

Wybrano przetwornicę Danfoss VLT 5042 (3x 380-500 VAC).

Porównanie parametrów przetwornicy zasilanej napięciem 380-440 [VAC] z obliczonymi parametrami silnika.

$$I_{VLT, N} = 73 \text{ [A]} \leftrightarrow I_z = 75,59 \text{ [A]}$$

$$I_{VLT, MAX} (60s) = 97,6 \text{ [A]} \leftrightarrow I_{pr} = 87,9 \text{ [A]}$$

$$E_{or} = \frac{1}{2} * t_{or} * M_{or} * \omega_s \text{ [J]}$$

$$E_{or} = \frac{1}{2} * 3,19 * 409,6 * 77,2 = 50435,69 \text{ [J]}$$

$$\underline{E_{or} = 50 \text{ [kJ]}}$$

$$E_{ou} = \frac{1}{2} * t_{ou} * M_{ou} * \omega_s \text{ [J]}$$
$$E_{ou} = \frac{1}{2} * 22,9 * 463 * 77,2 = 409264,22 \text{ [J]}$$

$$\underline{E_{ou} = 409 \text{ [kJ]}}$$

$$E_{oh} = \frac{1}{2} * t_{oh} * M_{oh} * \omega_s \text{ [J]}$$
$$E_{oh} = \frac{1}{2} * 3,19 * 516,4 * 77,2 = 63586,4 \text{ [J]}$$

$$\underline{E_{oh} = 64 \text{ [kJ]}}$$

$$P_R = (\Sigma E_x) / T = (\Sigma E_x) / (2 * t_{or} + t_{ou}) \text{ [W]}$$
$$P_R = (50435,69 + 409264,22 + 63586,4) / (2 * 3,19 + 22,9) = 17871,8 \text{ [W]}$$

$$\underline{P_R = 18 \text{ [kW]}}$$

$$P_{MAX} = P_{oh} = M_{oh} * \omega_s$$
$$P_{MAX} = 516,4 * 77,2 = 39866,08$$

$$\underline{P_{MAX} = 40 \text{ [kW]}}$$

Obliczenie wartości rezystora hamowania. Przyjęto $U_{Cmax} = 822 \text{ [V]}$.

$$I_{Hmax} = P_{MAX} / U_{Cmax} \text{ [A]}$$
$$I_{Hmax} = 39866,08 / 822 = 48,5 \text{ [A]}$$

$$\underline{I_{Hmax} = 48,5 \text{ [A]}}$$

$$R_H * I_{Hmax} < U_{Cmax} \text{ [}\Omega\text{]}$$
$$R_H < U_{Cmax} / I_{Hmax} \text{ [}\Omega\text{]}$$
$$R_H = U_{Cmax} / I_{Hmax} = 822 / 48,5 = 16,95 \text{ [}\Omega\text{]}$$

$$\underline{R_H = 16,95 \text{ [}\Omega\text{]}}$$

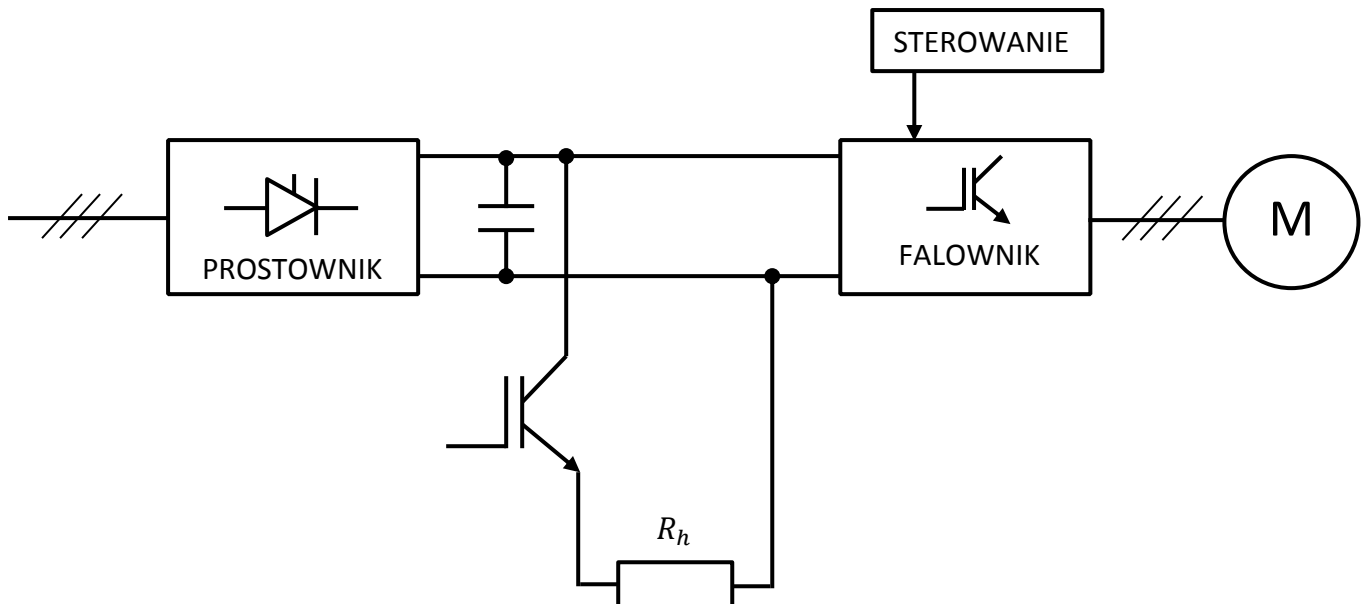
Z uwagi na zbliżone parametry obliczonego rezystora hamowania, wybrany został rezystor rekomendowany przez Danfoss (nr zamówieniowy 175U1952). Porównanie parametrów obliczonych z danymi katalogowymi.

Parametry obliczone:

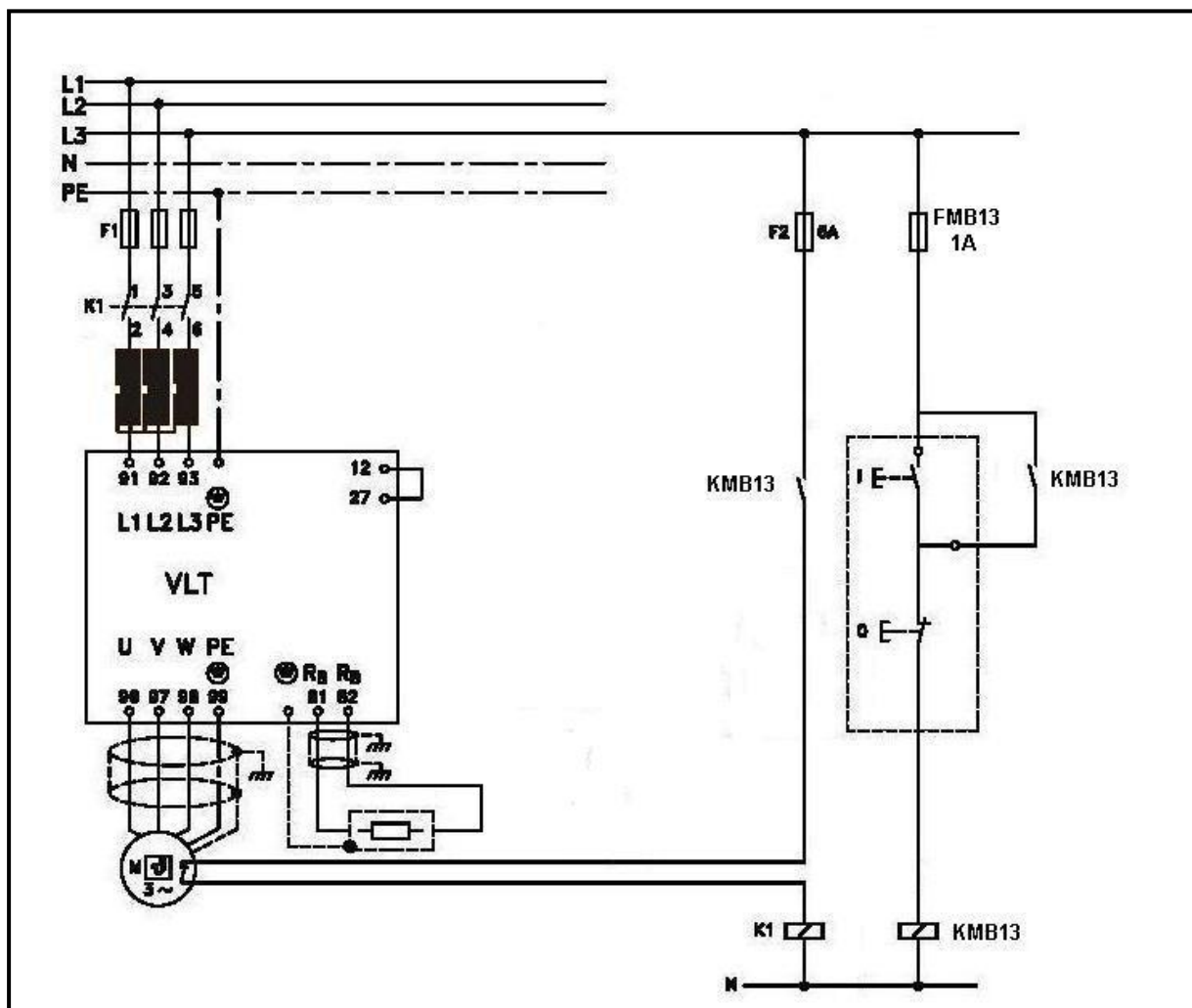
- $P_R = 18 \text{ [kW]}$
- $R_H = 16,95 \text{ [}\Omega\text{]}$

Parametry katalogowe

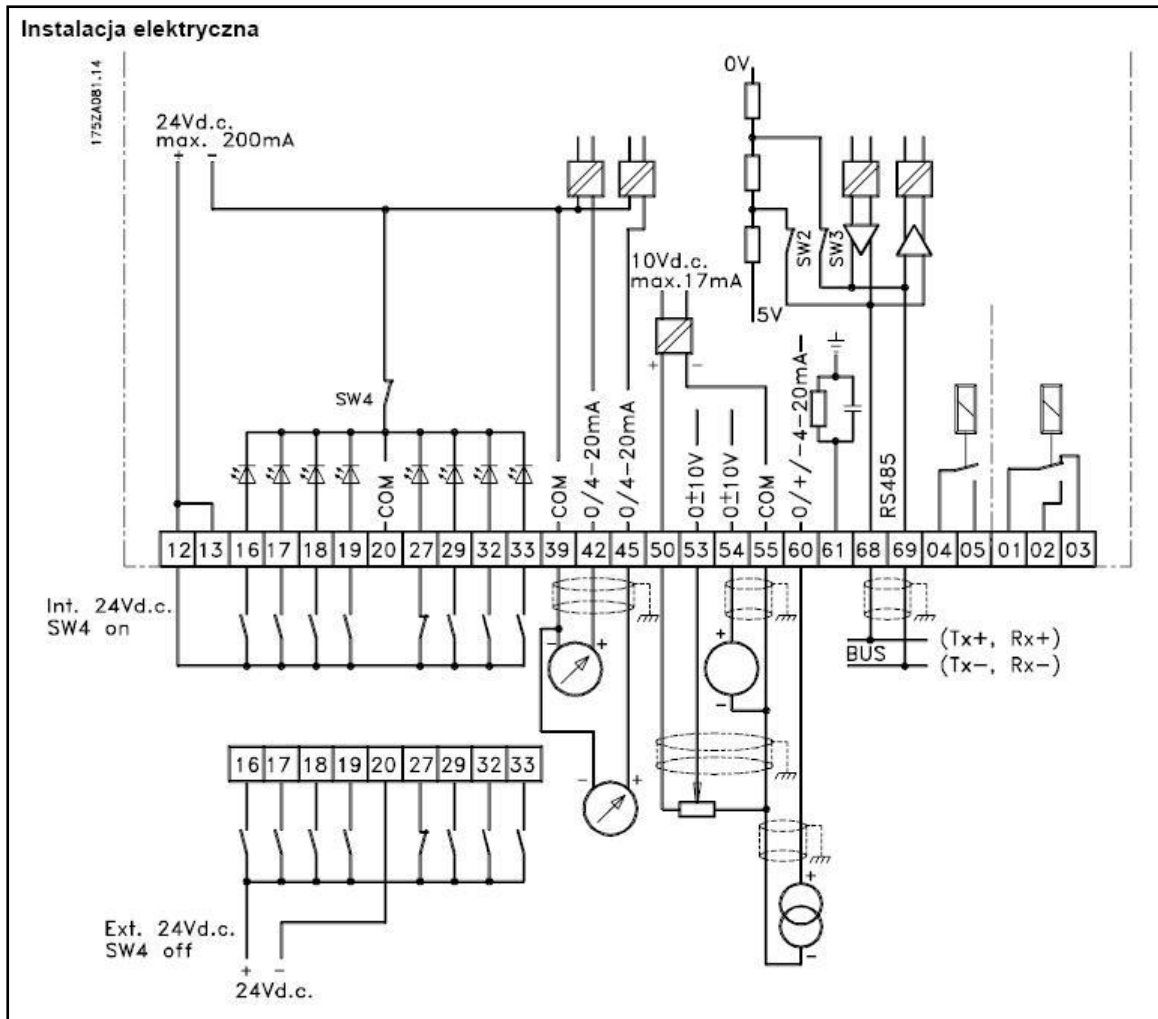
- $P_R = 15,6 \text{ [kW]}$
- $R_H = 15 \text{ [}\Omega\text{]}$



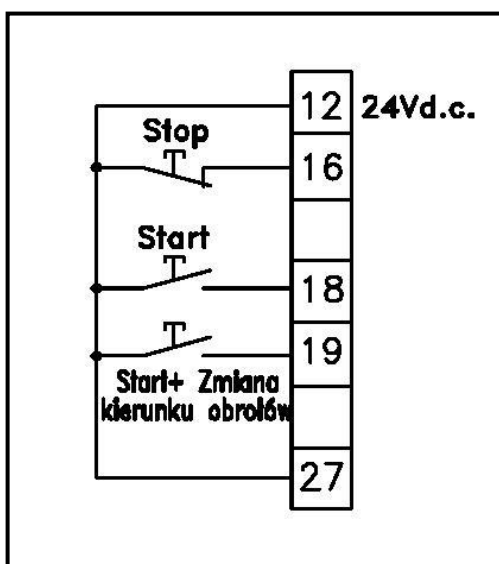
Rysunek 8. Rezystor hamowania włączony w obwód przetwornicy częstotliwości.



Rysunek 9. Podłączenie obwodów siłowych przetwornicy częstotliwości.



Rysunek 11. Schemat podłączeń obwodów sterowniczych przetwornicy częstotliwości VL marki Danfoss.



Rysunek 10. Podłączenie sterowania START/STOP.

Poz.:	Nr:	Parametr:	Jednostka:
1	001	Język	
2	102	Moc na wale silnika	[kW]
3	103	Napięcie silnika	[V]
4	104	Częstotliwość silnika	[Hz]
5	105	Prąd silnika	[A]
6	106	Znamionowa prędkość obrotowa silnika	[obr./min.]
7	107	Automatyczne dopasowanie silnika , AMA	
8	204	Minimalna wartość zadana	[Hz]
9	205	Maksymalna wartość zadana	[Hz]
10	207	Czas rozpędzania 1	[s]
11	208	Czas zwalniania 1	[s]
12	002	Sterowanie lokalne/zdalne	
13	003	Lokalna wartość zadana	

Rysunek 12. „Quick menu” przetwornicy częstotliwości. Pozwala na ustawienie najważniejszych parametrów.

Ustawione nastawy parametrów:

001 => Polski lub Angielski (English)

102 => 30 [kW]

103 => 400 [V]

104 => 50 [Hz]

105 => 64 [A]

106 => 737 [obr/min]

107 => wybrano [1] oznacza to załączone dopasowanie przetwornicy częstotliwości do rezystancji stojana R_s i jego reaktancji X_s .

204 => 0 [Hz]

205 => 50 [Hz]

207 => 3,19 [s]

208 => 3,19 [s]

002 => [0] oznacza sterowanie zdalne, z wykorzystaniem konfigurowalnych obwodów sterowniczych przetwornicy częstotliwości

003 => parametr zablokowany parametrem 013 => [0] oznacza zablokowanie sterowania lokalnego

Ustawianie parametrów wejść cyfrowych (od B16 do B33):

200 => [1] (zakres częstotliwości wyjściowej/kierunek) => oba kierunki

300 => [2] (B16 stop odwrócony)

302 => [2] (B18 start impulsowy)

303 => [1] (B19 start z zmianą kierunku obrotów)

Elementy elektryczne potrzebne do wykonania układu:

- 1) silnik CELMA 2Sg 225M8z
- 2) przetwornica częstotliwości Danfoss VLT 5042 (3x 380-500 VAC)
- 3) rezystor hamowania Danfoss nr zamówieniowy 175U1952
- 4) stycznik zasilający MOELLER ELECTRIC DILM80-22(230V50Hz) nr zamówieniowy 239449
- 5) dławik trójfazowy REO Inductive Components Nieke CNW 903/90
- 6) przewód zasilający przetwornicę TECHNOKABEL YKY 4x10 RE
- 7) przewód zasilający silnik (w podwójnym ekranie) LAPP KABELM STUTTGAT ÖLFLEX® CLASSIC 100 CY U0/U 450/750 V 4 G 10 nr artykułu 0035 0213
- 8) przewód obwodów sterowniczych 230VAC nkt cables H05V-K 1x1mm² (LgY 300/500V 1x1mm²)
- 9) przewód obwodów sterowniczych 24VDC nkt cables H05V-K 1x0,5mm² (LgY 300/500V 1x0,5mm²)
- 10) bezpiecznik i oprawa bezpiecznikowa zasilania: 3x Ferraz Shawmut gG 22x58 In=100A nr artykułu E218205J, 1x Ferraz Shawmut 22x58 podstawa nr artykułu J215656 nr katalogowy CC223
- 11) bezpieczniki i oprawy bezpiecznikowe sterowania 230VAC: 1x Ferraz Shawmut gG 8x32 In=1A nr artykułu A218709J, 1x Ferraz Shawmut gG 8x32 In=6A nr artykułu A211025J, 2x Ferraz Shawmut 8x32 podstawa nr artykułu X305000 nr katalogowy CMS81
- 12) Przycisk ON przycisk impulsowy Legrand Osmoz zestaw z główką płaską zielona 1z (nr ref. 0237 02)
- 13) przycisk OFF przycisk impulsowy Legrand Osmoz zestaw z główką płaską czerwoną 1r (nr ref. 0237 01)
- 14) przycisk START Schneider Electric XB6-AA31B XB6-AA11B (zielony NO)
- 15) przycisk zmiana obrotów Schneider Electric XB6-AA11B (biały NO)
- 16) przycisk STOP Schneider Electric XB6-AA42B (czerwony NO)
- 17) przekaźnik sterujący stycznikiem relpol typ: R15-2013-23-5230-WT 230VAC 50/60Hz
- 18) podstawka pod przekaźnik relpol R15 typ: PZ11-01