

PRZENOŚNIKI PŁYNÓW	NORMA BRANŻOWA	BN-71
	Wentylatory	1388-03
	Dobór elektrycznych silników asynchronicznych	Grupa katalogowa IV 82

1. WSTĘP

1.1. Przedmiot normy. Przedmiotem normy są szczegółowe wytyczne doboru jednobiegowych elektrycznych silników asynchronicznych zwartych, stosowanych do napędu wentylatorów.

1.2. Zakres stosowania normy. Normę należy stosować przy projektowaniu i produkcji wentylatorów. Norma nie dotyczy doboru silników elektrycznych do napędu kopalnianych wentylatorów miejscowego przewietrzania.

1.3. Określenia — wg PN-58/E-05012, PN-72/E-06000 oraz PN-75/M-43001.

1.4. Normy związane

PN-58/E-05012 Urządzenia elektroenergetyczne. Dobór silników elektrycznych oraz ich instalowanie. Przepisy ogólne

PN-72/E-06000 Maszyny elektryczne wirujące. Ogólne wymagania i badania

PN-63/E-08106 Osłony urządzeń elektroenergetycznych. Stopnie ochrony przed dotknięciem, przedostaniem się obcych ciał stałych oraz wody. Wymagania i badania techniczne

PN-72/E-08110 Elektryczne urządzenia przeciw-wybuchowe. Wymagania i badania wspólne dla różnych rodzajów budowy

PN-72/E-08116 Elektryczne urządzenia przeciw-wybuchowe. Urządzenia z osłoną ognioszczelną. Ogólne wymagania i badania

PN-75/M-43001 Wentylatory. Wielkości charakterystyczne. Nazwy, określenia, oznaczenia i jednostki

PN-77/M-43021 Wentylatory. Ogólne wymagania i badania

BN-65/3010-01 Maszyny elektryczne przystosowane do pracy w warunkach klimatu tropikalnego. Wymagania i badania techniczne

BN-76/3083-26.00 Elektryczne urządzenia przeciw-wybuchowe okrętowe. Wymagania i badania wspólne dla różnych rodzajów budowy

BN-76/3083-26.01 Elektryczne urządzenia przeciw-wybuchowe okrętowe. Urządzenia z osłoną ognioszczelną. Ogólne wymagania i badania

1.5. Najważniejsze oznaczenia wielkości i jednostki miar stosowane w normie podano w tabl. 1.

Tablica 1. Oznaczenia wielkości i jednostki miar

Oznaczenie	Wielkość	Jednostki miar stosowane we wzorach obliczeniowych	
		dla układu międzynarodowego SI	dla układu technicznego MKGS
1	2	3	4
A_2	Pole przekroju wylotowego koła	m^2	m^2
b_2	Szerokość wyjściowa wirnika	m	m
c	Ciepło właściwe	$J/(kg \cdot K)$	$kg \cdot m/(kg \cdot ^\circ C)$
d	Średnica piasty wirnika	m	m
D_2	Średnica zewnętrzna krawędzi splotu łopatek	m	m
D_s	Średnica obudowy nad łopatkami wirnika	m	m
g	Przyspieszenie ziemskie	m/s^2	m/s^2
GD^2	Moment zamachowy	$N \cdot m^2$	$kg \cdot m^2$
G	Ciężar	N	kg
i	Gęstość prądu	A/mm^2	A/mm^2
I	Prąd silnika	A	A
J	Moment bezwładności	$kg \cdot m^2$	$kg \cdot m \cdot s^2$
M	Moment	$N \cdot m$	$kg \cdot m$
M_o	Moment oporowy wentylatora	$N \cdot m$	$kg \cdot m$
M_s	Moment obrotowy silnika	$N \cdot m$	$kg \cdot m$
M_d	Moment przyspieszający	$N \cdot m$	$kg \cdot m$

Instytut Techniki Ciepłej

Ustanowiona przez Dyrektora Zjednoczenia Przemysłu Budowy Maszyn Ciężkich dnia 13 lipca 1971 r.
jako norma obowiązująca w zakresie projektowania i produkcji od dnia 1 stycznia 1972 r.

(Mon. Pol. nr 53/1971 r. poz. 348)

cd. tabl. 1

Oznaczenie	Wielkość	Jednostki miar stosowane we wzorach obliczeniowych	
		dla układu międzynarodowego SI	dla układu technicznego MKGS
1	2	3	4
$M_o(N-p)$	Średni moment oporowy wentylatora przy samorozruchu	N · m	kG · m
$M_s(N-p)$	Średni moment obrotowy silnika przy samorozruchu	N · m	kG · m
$M_d(N-p)$	Średni moment przyspieszający przy samorozruchu	N · m	kG · m
m	Masa	kg	kG · s ² /m
N	Moc	W	W
N_w	Moc na wale silnika	W	W
N_1	Moc wentylatora w punkcie pracy	W	W
ΔN_1	Przyrost mocy wynikający z tolerancji wykonania wentylatora	W	W
ΔN_2	Przyrost mocy wynikający z pochylenia krzywej mocy wentylatora	W	W
n	Prędkość obrotowa	—	obr/min
n_s	Synchroniczna prędkość obrotowa silnika	—	obr/min
n_p	Prędkość obrotowa silnika w chwili załączenia rezerwowego zasilania	—	obr/min
Δp_c	Śpiętrzenie całkowite wentylatora	N/m ²	kG/m ²
t_r	Czas rozruchu	s	s
t_{st}	Stała czasowa rozruchu silnika	s	s
t_{sr}	Czas samorozruchu	s	s
t_p	Czas przerwy przy samorozruchu	s	s
u	Prędkość obwodowa	m/s	m/s
U	Napięcie	V	V
U_s	Napięcie przy samorozruchu	V	V
\dot{V}	Wydajność wentylatora	m ³ /s	m ³ /s
\dot{V}_p	Wydajność wentylatora odpowiadająca punktowi pracy	m ³ /s	m ³ /s
\dot{V}_m	Wydajność odpowiadająca punktowi przecięcia się krzywej minimalnych oporów instalacji z krzywą spiętrzenia wentylatora	m ³ /s	m ³ /s
β_2	Kąt łopatki na wylocie	stopnie katowe	stopnie katowe
γ	Ciężar właściwy czynnika	N/m ³	kG/m ³
η_c	Sprawność całkowita wentylatora w punkcie pracy	—	—
η_p	Sprawność przekładni odpowiadająca punktowi pracy wentylatora	—	—
ρ	Gęstość czynnika	kg/m ³	kG · s ² /m ⁴
$\Delta \vartheta$	Przyrost temperatury stojana silnika	K	°C
$\Delta \vartheta_k$	Przyrost temperatury klatki wirnika silnika	K	°C
$\Delta \vartheta_{sr}$	Przyrost temperatury stojana silnika przy samorozruchu	K	°C
ω	Prędkość kątowna	rad/s	—
ω_p	Prędkość kątowna silnika w chwili załączenia rezerwowego zasilania	rad/s	—
ω_s	Synchroniczna prędkość kątowna silnika	rad/s	—
INDEKSY			
N	Wielkość znamionowa		
w	Wielkość dotycząca wentylatora		
s	Wielkość dotycząca silnika		
r	Wielkość rozruchowa		
sr	Wielkość średnia		
dop	Wielkość dopuszczalna		

2. DOBÓR SILNIKA

2.1. Ogólne zasady doboru silnika — wg PN-58/E-05012.

2.2. Dobór silnika w zależności od typu wentylatora. Moc na wale silnika (N_w) należy obliczyć w watach wg wzoru

$$N_w = N_1 + \Delta N_1 + \Delta N_2 \quad (1)$$

Poszczególne składniki wzoru (1) są następujące:

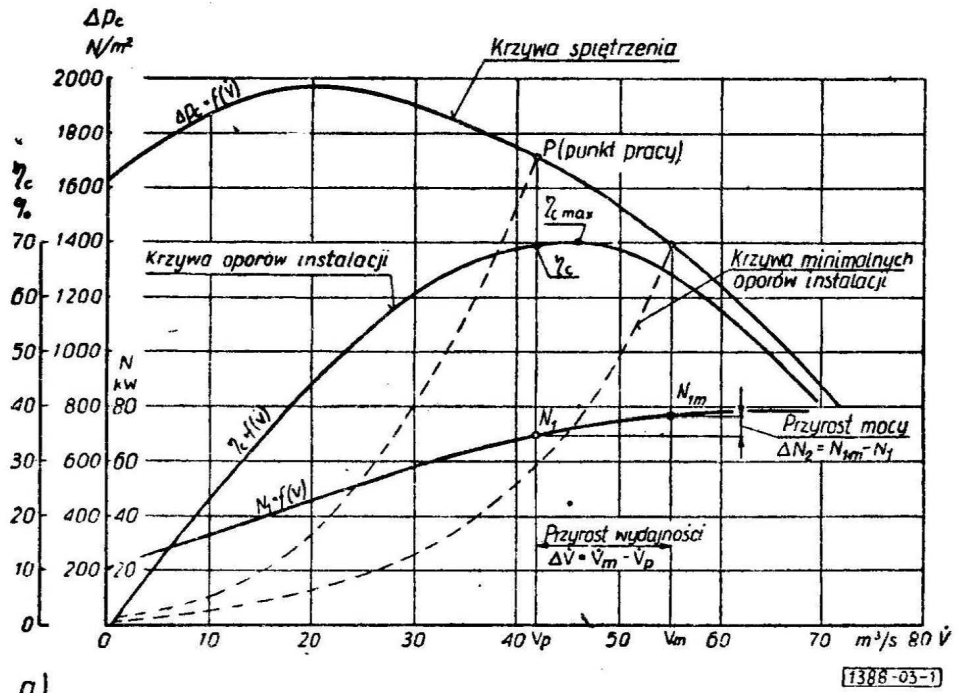
N_1 — moc wentylatora odpowiadająca punktowi pracy P leżącemu na krzywej spiętrzenia lub krzywej maksymalnego spiętrzenia wentylatora wg rys. 1 i 2; moc tę należy odczytać z wykresu charakterystyki wentylatora lub obliczyć w watach wg wzoru

$$N_1 = \frac{\dot{V}_p \cdot \Delta p_c}{\eta_c \cdot \eta_p} \quad (2)$$

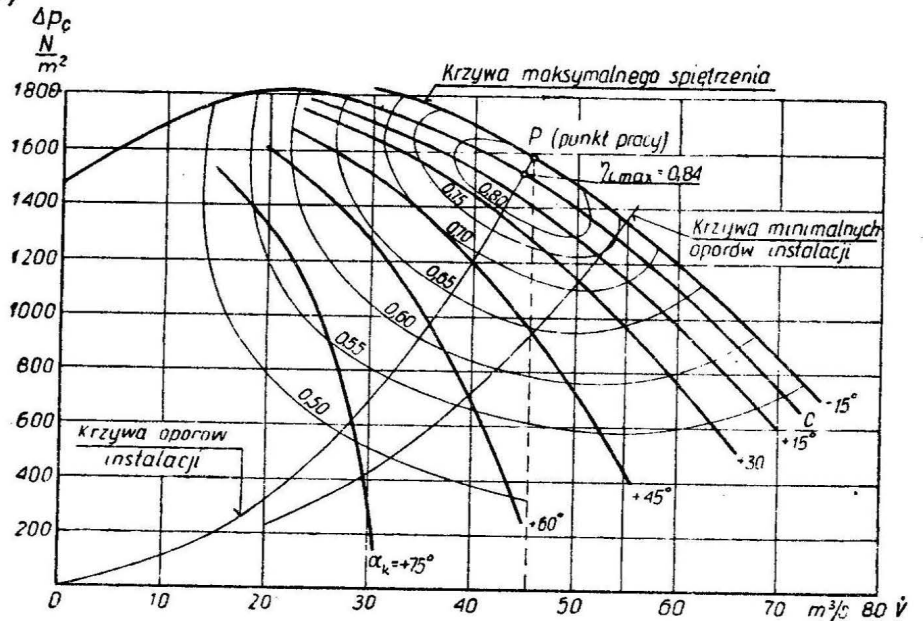
w którym:

\dot{V}_p — wydajność odpowiadająca punktowi pracy P , m³/s,

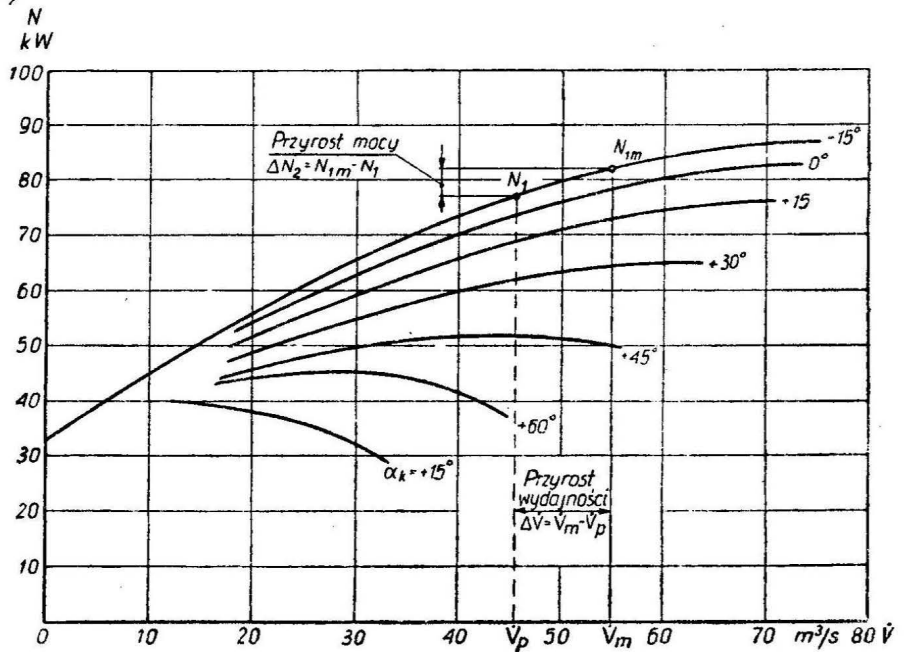
Rys. 1. Punkt pracy wentylatora i przyrost mocy wynikający z pochylecia krzywej mocy dla wentylatora bez regulacji (wartości liczbowe podano przykładowo)



a)



b)



Rys. 2. Punkt pracy wentylatora i przyrost mocy wynikający z pochylecia krzywej mocy dla wentylatora z regulacją (wartości liczbowe podano przykładowo)

Δp_c — spiętrzenie całkowite w punkcie pracy P , N/m^2 ,
 η_c — sprawność całkowita wentylatora odpowiadająca punktowi pracy P ,
 η_p — sprawność przekładni odpowiadająca punktowi pracy P (w przypadku braku przekładni należy przyjąć $\eta_p = 1$)
 lub w watach wg wzoru

$$N_1 = \frac{V_p \cdot \Delta p_c}{0,102 \cdot \eta_c \cdot \eta_p} \quad (3)$$

w którym:

Δp_c — spiętrzenie całkowite w punkcie pracy P , kG/m^2 ,
 pozostałe oznaczenia jak we wzorze (2);

ΔN_1 — przyrost mocy wynikający z tolerancji wykonania wentylatora i tolerancji pomiarów obliczony w watach wg wzoru

$$\Delta N_1 = K \cdot N_1 \quad (4)$$

w którym:

N_1 — moc wentylatora, W ,

K — współczynnik zapasu mocy podany w tabl. 2.

Tablica 2. Współczynnik zapasu mocy z uwzględnieniem tolerancji pomiarów

Moc wentylatora N_1 kW	Współczynnik K
0,5 do 1	0,14
powyżej 1 do 2,5	0,13
powyżej 2,5 do 5	0,12
powyżej 5 do 10	0,12
powyżej 10 do 25	0,105
powyżej 25 do 50	0,09
powyżej 50 do 100	0,08
powyżej 100 do 200	0,07
powyżej 200	0,06

ΔN_2 — przyrost mocy wynikający z pochylenia krzywej mocy wentylatora w funkcji jego wydajności $N_1 = f(\dot{V})$ (rys. 1 i 2).

W przypadku ujemnego przyrostu mocy wynikającego z pochylenia krzywej mocy wentylatora (np. krzywa mocy opadająca) należy przyjąć $\Delta N_2 = 0$.

Przyrost mocy ΔN_2 należy odczytać z wykresu charakterystyki wentylatora dla przyrostu wydajności $\Delta \dot{V} = \dot{V}_m - \dot{V}_p$ w sposób przedstawiony na rys. 1 lub 2. Przyrost wydajności $\Delta \dot{V} = \dot{V}_m - \dot{V}_p$ należy ustalić na podstawie minimalnych oporów instalacji określonych przez użytkownika, jako różnicę między wydajnością \dot{V}_m odpowiadającą punktowi przecięcia się krzywej minimalnych oporów instalacji z krzywą spiętrzenia wentylatora a wydajnością \dot{V}_p odpowiadającą punktowi pracy P wentylatora. W przypadku gdy użytkownik nie określi minimalnych oporów instalacji, przyrost wydajności należy przyjąć

$$\Delta \dot{V} = \dot{V}_m - \dot{V}_p \geq 0,25 \cdot \dot{V}_p$$

W przypadku braku przebiegu krzywej mocy wentylatora i braku minimalnych oporów instalacji dopuszcza się określenie przybliżone przyrostu mocy (ΔN_2) w watach wg wzoru

$$\Delta N_2 = \left(\Delta p_c - \frac{\rho \cdot V_p \cdot u}{A_2} \operatorname{ctg} \beta_2 \right) \cdot 0,25 \cdot \dot{V}_p \quad (5)$$

w którym:

Δp_c — spiętrzenie całkowite w punkcie pracy P , N/m^2 ,

\dot{V}_p — wydajność odpowiadająca punktowi pracy P , m^3/s ,

ρ — gęstość czynnika, kg/m^3 ,

u — prędkość obwodowa, m/s

— dla wentylatorów promieniowych prędkość obwodowa (u_2) krawędzi splywu łopatek koła wirnika,

— dla wentylatorów osiowych prędkość obwodowa łopatki w połowie jej wysokości,

A_2 — pole przekroju wylotowego koła wirnika, m^2

— dla wentylatorów promieniowych w metrach kwadratowych

$$A_2 = \pi \cdot D_2 \cdot b_2 \quad (6)$$

gdzie:

D_2 — średnica zewnętrzna krawędzi splywu łopatek, m ,

b_2 — szerokość wyjściowa wirnika, m ;

— dla wentylatorów osiowych w metrach kwadratowych

$$A_2 = \frac{\pi}{4} (D_2^2 - d^2) \quad (7)$$

gdzie:

D_2 — średnica obudowy nad łopatkami wirnika, m ,

d — średnica piasty bębna wirnika, m ,

β_2 — kąt łopatki na wylocie (kąt między styczną do szkieletowej na krawędzi splywu łopatki, a styczną do obwodu), stopnie;

— dla wentylatorów promieniowych w połowie szerokości wyjściowej wirnika,

— dla wentylatorów osiowych w połowie wysokości łopatki

lub w watach wg wzoru

$$\Delta N_2 = \left(\Delta p_c \cdot g - \frac{\gamma \cdot \dot{V}_p \cdot u}{A_2} \operatorname{ctg} \beta_2 \right) 0,25 \cdot \dot{V}_p \quad (8)$$

w którym:

Δp_c — spiętrzenie całkowite w punkcie pracy P , kG/m^2 ,

γ — ciężar właściwy czynnika, kG/m^3 ,

g — przyspieszenie ziemskie, m/s^2 ,

pozostałe oznaczenia jak we wzorze (5).

Moc znamionową silnika (N_N) dobiera się z katalogu silników, przyjmując za podstawę moc na wale wentylatora (N_w) obliczoną wg wzoru (1), przy czym jeśli moc ta znaj-

duże się pomiędzy kolejnymi wartościami mocy katalogowej, należy przyjąć moc większą z ciągu mocy katalogowych.

2.3. Dobór silnika w zależności od warunków zainstalowania wentylatora. Rodzaj budowy silnika i związany z nim stopień ochrony oraz sposób chłodzenia silnika zaleca się dobierać wg tabl. 3 w zależności od rodzaju pomieszczenia, w którym będzie zainstalowany silnik.

W przypadku gdy silnik jest przewidziany do pracy w klimatach tropikalnych, należy dobierać rodzaj wykonania tropikalnego silnika wg BN-65/3010-01 p. 1.2.

GD^2 — całkowity moment zamachowy zespołu silnik-wentylator zredukowany do znamionowej prędkości obrotowej silnika, $\text{kG} \cdot \text{m}^2$,

GD_s^2 — moment zamachowy wirnika silnika przy znamionowej prędkości obrotowej silnika, $\text{kG} \cdot \text{m}^2$,

J — całkowity moment bezwładności zespołu silnik-wentylator, zredukowany do znamionowej prędkości kątowej silnika, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$,

J_s — moment bezwładności wirnika silnika przy znamionowej prędkości kątowej silnika, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$.

Tablica 3. Rodzaj budowy, stopień ochrony i sposób chłodzenia silnika w zależności od rodzaju pomieszczenia

Rodzaj pomieszczenia	Rodzaj budowy wg PN-72/E-06000		Stopień ochrony wg PN-63/E-08106	Sposób chłodzenia wg PN-72/E-06000
	nazwa	symbol		
Sucho ¹⁾	chroniona	B	IP22	A
Przejściowo wilgotne ¹⁾	okapturzona	C	IP23	
Wilgotne ¹⁾ Bardzo wilgotne ¹⁾ Z pyłem ¹⁾ O wyziewach żrących ¹⁾ Na zewnątrz pomieszczenia	zamknięta	Z	IP44	B lub C
Na zewnątrz pomieszczenia	strugoszczelna	S	IP55	
Niebezpieczne pod względem ogniowym i wybuchowym ¹⁾	ognioszczelna ²⁾	—	—	

Sposób chłodzenia:
 A — chłodzenie wewnętrzne własne powietrzem zasysanym z bezpośredniego otoczenia maszyny i wydmuchiwany do tego samego otoczenia,
 B — chłodzenie naturalne powierzchniowe, przy którym gładka lub uźebrowana powierzchnia zewnętrzna maszyny jest chłodzona przez wymianę ciepła z otaczającym powietrzem,
 C — chłodzenie powierzchniowe i rurowe własne lub obce, przy którym gładka lub uźebrowana powierzchnia maszyny lub zewnętrzna powierzchnia rur wbudowanych w kadłub maszyny jest omywana przez powietrze dostarczone przez wentylator zewnętrznego obiegu wentylacyjnego.

¹⁾ Wg PN-58/E-05012.
²⁾ Wg PN-72/E-08110 i PN-72/E-08116 lub BN-76/3083-26.00 i BN-76/3083-26.01

3. SPRAWDZENIE DOBORU SILNIKA

3.1. Sprawdzenie rozruchu. Silniki o mocy znamionowej do 75 kW zaleca się, a silniki o mocy znamionowej powyżej 75 kW należy sprawdzać na warunki rozruchu od zerowej prędkości obrotowej, przy czym silniki o mocy do 200 kW dopuszcza się sprawdzać metodą uproszczoną wg 3.2.

3.2. Sprawdzenie rozruchu metodą uproszczoną. Przy sprawdzaniu rozruchu metodą uproszczoną należy wyznaczyć:

a) czas rozruchu (t_r) w sekundach wg wzoru

$$t_r = 1,8 \cdot t_{st} \cdot \frac{GD^2}{GD_s^2} \quad (11)$$

lub w sekundach wg wzoru

$$t_r = 1,8 \cdot t_{st} \cdot \frac{J}{J_s} \quad (12)$$

w których:

t_{st} — stała czasowa rozruchu silnika, wg tabl. 4 (czas potrzebny do rozruchu silnika bez obciążenia), s,

Całkowity moment zamachowy zespołu silnik-wentylator, zredukowany do znamionowej prędkości obrotowej silnika, należy obliczyć w $\text{kG} \cdot \text{m}^2$ wg wzoru

$$GD^2 = GD_s^2 + GD_w^2 \left(\frac{n_w}{n_N} \right)^2 \quad (13)$$

w którym:

GD_w^2 — moment zamachowy wirnika wentylatora przy prędkości obrotowej n_w , $\text{kG} \cdot \text{m}^2$,

n_N — znamionowa prędkość obrotowa silnika, obr/min,

n_w — prędkość obrotowa wentylatora w punkcie pracy P, obr/min.

Moment bezwładności zespołu silnik-wentylator, zredukowany do znamionowej prędkości kątowej silnika (J), należy obliczyć w $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ wg wzoru

$$J = J_s + J_w \left(\frac{\omega_w}{\omega_N} \right)^2 \quad (14)$$

w którym:

J_s — moment bezwładności wirnika silnika przy znamionowej prędkości kątowej silnika, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$,

J_w — moment bezwładności wirnika wentylatora przy prędkości kątowej ω_w , $\text{kg} \cdot \text{m}^2$,

ω_N — znamionowa prędkość kątowa silnika, rad/s ,

ω_w — prędkość kątowa wentylatora w punkcie pracy P , rad/s ;

w których:

N_N — znamionowa moc silnika, kW,

n_N — znamionowa prędkość obrotowa silnika, obr/min ,

ω_N — znamionowa prędkość kątowa silnika, rad/s ;

b) moment oporowy (obciążeniowy) wentylatora w funkcji prędkości obrotowej (kątowej) (M_o) w $\text{kG} \cdot \text{m}$ wg wzoru

$$M_o = k_1 \cdot M_N + k_2 \cdot M_N \left(\frac{n}{n_N} \right)^2 \quad (18)$$

Tablica 4. Stała czasowa rozruchu silnika

Rodzaj budowy silnika wg PN-72/E-06000	Prędkość silnika		Stała czasowa rozruchu silnika, s				
			dla mocy silnika, kW				
	obrotowa obr/min	kątowa rad/s	do 10	10 ÷ 25	25 ÷ 50	50 ÷ 100	100 ÷ 200
B, C	3000	314	0,2	0,275	0,4	0,6	0,85
	1500	157	0,1	0,15	0,2	0,3	0,45
	500 ÷ 1000	52,3 ÷ 104,7	0,750	0,1	0,15	0,25	0,35
Z, S ognioszczelna	3000	314	0,4	0,55	0,8	1,2	1,7
	1500	157	0,2	0,3	0,4	0,6	0,9
	500 ÷ 1000	52,3 ÷ 104,7	0,15	0,2	0,3	0,5	0,7

b) przyrost temperatury stojana silnika ($\Delta\theta$) w stopniach Celsjusza lub Kelvina wg wzoru

$$\Delta\theta = 5,5 \cdot i_N^2 \left(\frac{I_r}{I_N} \right)^2 \cdot t_r \cdot 10^{-3} \quad (15)$$

w którym:

t_r — czas rozruchu zespołu silnik-wentylator, obliczany wg wzoru (11) lub (12), s,

i_N — znamionowa gęstość prądu w uzwojeniu stojana silnika, A/mm^2 ,

$\frac{I_r}{I_N}$ — krotność prądu rozruchowego silnika (I_r — prąd rozruchowy, I_N — znamionowy prąd silnika).

Przyrost temperatury obliczony wg wzoru (15) powinien być mniejszy od przyrostu dopuszczalnego podanego w PN-72/E-06000 p. 2.12.

W przypadku gdy przyrost temperatury przekracza wartość dopuszczalnego przyrostu temperatury, należy dobrać silnik z ulepszonym rozruchem (silnik dwukłatkowy) lub, jeśli to nie wystarcza, można, w przypadkach uzasadnionych ekonomicznie, dobrać silnik o większej mocy pod warunkiem, że przyrost temperatury nie przekroczy wartości dopuszczalnej.

3.3. Sprawdzenie rozruchu metodą dokładną. Przy sprawdzaniu rozruchu silnika metodą dokładną należy wyznaczyć:

a) moment znamionowy silnika (M_N) w $\text{kG} \cdot \text{m}$ wg wzoru

$$M_N = 975 \frac{N_N}{n_N} \quad (16)$$

lub w $\text{N} \cdot \text{m}$

$$M_N = 1000 \frac{N_N}{\omega_N} \quad (17)$$

lub w $\text{N} \cdot \text{m}$

$$M_o = k_1 \cdot M_N + k_2 \cdot M_N \left(\frac{\omega}{\omega_N} \right)^2 \quad (19)$$

w których:

M_N — moment znamionowy silnika wg wzoru (16) lub (17), $\text{kG} \cdot \text{m}$ lub $\text{N} \cdot \text{m}$,

n — prędkość obrotowa w zakresie od $n = 0,05n_N$ do $n = n_N$, obr/min ,

n_N — znamionowa prędkość obrotowa silnika, obr/min ,

ω — prędkość kątowa w zakresie od $\omega = 0,05 \omega_N$ do $\omega = \omega_N$, rad/s ,

ω_N — znamionowa prędkość kątowa silnika, rad/s ,

$k_1 = 0,05$ — stały współczynnik,

k_2 — stały współczynnik

— dla wentylatora z wolnym wlotem i z wolnym wylotem lub wentylatora z wolnym wylotem, zainstalowanego na końcu sieci, należy przyjmować

$$k_2 = 0,45$$

— dla wentylatora z wolnym wlotem, zainstalowanego na początku sieci lub wentylatora połączonego z przewodem po stronie ssawnej i tłocznej, należy przyjmować

$$k_2 = 0,95$$

Moment oporowy wentylatora przy prędkości obrotowej (kątowej) równej zero należy przyjąć $M_o = 0,3 M_N$. Przebieg momentu oporowego w zakresie od $n = 0$ do $n = 0,05 n_N$ (lub od $\omega = 0$ do $\omega = 0,05 \omega_N$) można zastąpić linią prostą;

c) moment przyspieszający (dynamiczny) zespołu silnik-wentylator przy sztywnym zesprzęgleniu (M_d) w $\text{kG} \cdot \text{m}$ lub $\text{N} \cdot \text{m}$ wg wzoru

$$M_d = 0,81 \cdot M_{s, sr} - M_{o, sr} \quad (20)$$

w którym:

$M_{s, sr}$ — średni moment obrotowy silnika, $\text{kG} \cdot \text{m}$ lub $\text{N} \cdot \text{m}$,

$M_{o, sr}$ — średni moment oporowy wentylatora, $\text{kG} \cdot \text{m}$ lub $\text{N} \cdot \text{m}$.

Średni moment obrotowy silnika $M_{s, sr}$ i średni moment oporowy wentylatora $M_{o, sr}$ należy określić, wyznaczając pole powierzchni odpowiednio pod krzywą przebiegu momentu obrotowego silnika w funkcji prędkości obrotowej (kątovej) $M_s = f(n)$ i pod krzywą przebiegu momentu oporowego wentylatora w funkcji prędkości obrotowej (kątovej) $M_o = f(n)$, w zakresie od $n = 0$ do $n = n_N$ i zastępując te pola równoważnymi prostokątami o podstawie $b = n_N$ i wysokościach odpowiednio $M_{s, sr}$ i $M_{o, sr}$;

d) czas rozruchu zespołu silnik-wentylator w sekundach wg wzoru

$$t_r = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{n_N}{M_d} \quad (21)$$

w którym:

GD^2 — całkowity moment zamachowy zespołu silnik-wentylator, zredukowany do znamionowej prędkości obrotowej silnika wg wzoru (13), $\text{kG} \cdot \text{m}^2$,

n_N — znamionowa prędkość obrotowa silnika, obr/min,

M_d — średni moment przyspieszający zespołu silnik-wentylator wg wzoru (20), $\text{kG} \cdot \text{m}$

lub w sekundach wg wzoru

$$t_r = \frac{J \cdot \omega_N}{M_d} \quad (22)$$

w którym:

J — całkowity moment bezwładności zespołu silnik-wentylator, zredukowany do znamionowej prędkości kątovej silnika obliczony wg wzoru (14), $\text{kg} \cdot \text{m}^2$,

ω_N — znamionowa prędkość kątovej silnika, rad/s,

M_d — średni moment przyspieszający zespołu silnik-wentylator, obliczony wg wzoru (20), $\text{N} \cdot \text{m}$;

e) przyrost temperatury stojana silnika wg wzoru (15). Obliczony przyrost temperatury stojana powinien być mniejszy od podanego w PN-72/E-06000 p. 2.12.

W przypadku gdy przyrost temperatury stojana przekracza wartość dopuszczalnego przyrostu temperatury, należy dobrać silnik z ulepszonym rozruchem (silnik dwuklatkowy) lub, jeśli to nie wystarcza, można, w przypadkach uzasadnionych ekonomicznie, dobrać silnik o większej mocy pod warunkiem, że przyrost temperatury nie przekroczy wartości dopuszczalnej;

f) oprócz tego dla czasów rozruchu przekraczających 15 s, zaleca się obliczyć przyrost temperatury klatki wirnika ($\Delta\vartheta_k$) w stopniach Celsjusza lub Kelvina wg wzoru

$$\Delta\vartheta_k = \frac{0,81 \cdot GD^2 \cdot n_s^2 \cdot M_{s, sr}}{7160 \cdot c \cdot G \cdot M_d} \leq \Delta\vartheta_{k, dop} \quad (23)$$

w którym:

GD^2 — całkowity moment zamachowy zespołu silnik-wentylator, zredukowany do znamionowej prędkości obrotowej silnika, $\text{kG} \cdot \text{m}^2$,

n_s — synchroniczna prędkość obrotowa silnika, obr/min,

$M_{s, sr}$ — średni moment obrotowy silnika, $\text{kG} \cdot \text{m}$,

M_d — średni moment przyspieszający, $\text{kG} \cdot \text{m}$,

c — ciepło właściwe materiału pręta wirnika silnika, $\text{kG} \cdot \text{m}/(\text{kG} \cdot ^\circ\text{C})$,

G — ciężar klatki wirnika silnika, kG ,

$\Delta\vartheta_{k, dop}$ — dopuszczalny przyrost temperatury klatki wirnika, $^\circ\text{C}$ lub K

lub w stopniach Celsjusza lub Kelvina wg wzoru

$$\Delta\vartheta_k = \frac{0,81 \cdot J \cdot \omega_s^2 \cdot M_{s, sr}}{20,05 \cdot c \cdot m \cdot M_d} \leq \Delta\vartheta_{k, dop} \quad (24)$$

w którym:

J — całkowity moment bezwładności zespołu silnik-wentylator, zredukowany do znamionowej prędkości kątovej silnika, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$,

ω_s — synchroniczna prędkość kątovej silnika, rad/s,

$M_{s, sr}$ — średni moment obrotowy silnika, $\text{N} \cdot \text{m}$,

M_d — średni moment przyspieszający, $\text{N} \cdot \text{m}$,

c — ciepło właściwe materiału pręta wirnika silnika, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$,

m — masa klatki wirnika silnika, kg ,

$\Delta\vartheta_{k, dop}$ — dopuszczalny przyrost temperatury klatki wirnika, $^\circ\text{C}$ lub K .

3.4. Sprawdzenie samorozruchu. Na warunki samorozruchu należy sprawdzać silniki, które biorą udział w samoczynnym załączeniu rezerwy (SZR).

Przy sprawdzaniu samorozruchu należy wyznaczyć:

a) czas samorozruchu zespołu silnik-wentylator (t_{sr}) w sekundach wg wzoru

$$t_{sr} = \frac{GD^2(n_N - n_p)}{375 \cdot M_{d(N-p)}} \quad (25)$$

w którym:

GD^2 — całkowity moment zamachowy zespołu silnik-wentylator, zredukowany do znamionowej prędkości obrotowej silnika, $\text{kG} \cdot \text{m}^2$,

n_N — znamionowa prędkość obrotowa silnika, obr/min,

n_p — prędkość obrotowa silnika w chwili załączenia rezerwowego zasilania po czasie przerwy t_p , obr/min,

$M_{d(N-p)}$ — średni moment przyspieszający w zakresie prędkości obrotowej od n_p do n_N , $\text{kG} \cdot \text{m}$

lub w sekundach wg wzoru

$$t_{sr} = \frac{J(\omega_N - \omega_p)}{M_{d(N-p)}} \quad (26)$$

w którym:

J — całkowity moment bezwładności zespołu silnik-wentylator, zredukowany do znamionowej prędkości kątowej silnika, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$,

ω_N — znamionowa prędkość kątowa silnika, rad/s ,

ω_p — prędkość kątowa silnika w chwili załączania rezerwowego zasilania po czasie przerwy t_p , rad/s ,

$M_{d(N-p)}$ — średni moment przyspieszający w zakresie prędkości kątowej od ω_p do ω_N , $\text{N} \cdot \text{m}$.

Średni moment przyspieszający w zakresie prędkości obrotowej ($M_{d(N-p)}$) od n_p do n_N (ω_p do ω_N), wchodzący do wzoru (25) lub (26) należy wyznaczyć w $\text{kG} \cdot \text{m}$ lub $\text{N} \cdot \text{m}$ wg wzoru

$$M_{d(N-p)} = M_{s(N-p)} \left(\frac{U_{sr}}{U_N} \right)^2 - M_{o(N-p)} \quad (27)$$

w którym:

$M_{s(N-p)}$ — średni moment obrotowy silnika w zakresie prędkości obrotowej od n_p do n_N (ω_p do ω_N), $\text{kG} \cdot \text{m}$ lub $\text{N} \cdot \text{m}$,

$M_{o(N-p)}$ — średni moment oporowy wentylatora w zakresie prędkości obrotowej od n_p do n_N (ω_p do ω_N), $\text{kG} \cdot \text{m}$ lub $\text{N} \cdot \text{m}$,

U_{sr} — napięcie samorozruchu, V ,

U_N — napięcie znamionowe, V .

W przypadku braku danych prędkości obrotowej n_p lub prędkości kątowej ω_p i napięcia samorozruchu U_{sr} zaleca się przyjąć następujące wartości:

$$n_p \geq 0,8 n_N,$$

$$\omega_p \geq 0,8 \omega_N,$$

$$U_{sr} \geq 0,75 U_N \quad (\text{dla silników o napięciu znamionowym } U_N = 6000 \text{ V})$$

$$U_{sr} \geq 0,70 U_N \quad (\text{dla silników o napięciu znamionowym } U_N = 380 \text{ i } 220 \text{ V});$$

b) przyrost temperatury stojana silnika w stopniach Celsjusza lub Kelvina ponad temperaturę ustaloną przed zadziałaniem urządzenia do samoczynnego załączania rezerwy ($\Delta\vartheta_{sr}$) wg wzoru

$$\Delta\vartheta_{sr} = 6,8 \cdot i_N^2 \left[\left(\beta \frac{U_{sr}}{U_N} \cdot \frac{I_r}{I_N} \right)^2 - 1 \right] \cdot t_{sr} \cdot 10^{-3} \leq 16 \quad (28)$$

w którym:

i_N — znamionowa gęstość prądu, A/mm^2 ,

U_{sr} — napięcie samorozruchu, V ,

U_N — napięcie znamionowe silnika, V ,

$\frac{I_r}{I_N}$ — krotność prądu rozruchowego silnika,

β — $0,55 \div 0,7$ — współczynnik zmniejszający krotność prądu rozruchowego przy samorozruchu,

t_{sr} — czas samorozruchu wg wzoru (25) lub (26), s

K O N I E C

INFORMACJE DODATKOWE do BN-71/1388-03

PRZYKŁADY DOBORU SILNIKÓW NAPĘDOWYCH DO WENTYLATORÓW

1. Przykład doboru silnika elektrycznego do napędu wentylatora promieniowego ogólnego przeznaczenia z wirnikiem typu bębnowego osadzonym bezpośrednio na wałku silnika.

Optymalne wielkości charakterystyczne pracy wentylatora są następujące:

wydajność	$\dot{V} = 2,22 \text{ m}^3/\text{s}$,
spiętrzenie całkowite	$\Delta p_c = 69 \text{ kG/m}^2 = 677 \text{ N/m}^2$,
sprawność całkowita	$\eta_c = 0,70$
prędkość obrotowa (kątowa)	$n = 705 \text{ obr/min}$ ($\omega = 73,8 \text{ rad/s}$),

gęstość czynnika	$\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$,
moment zamachowy wirnika	$GD_w^2 = 15,5 \text{ kG} \cdot \text{m}^2$,
napięcie zasilania silnika	$U = 380 \text{ V}$.

Wielkości geometryczne wentylatora są następujące:

średnica zewnętrzna krawędzi spływu łopatek	$D_2 = 500 \text{ mm}$,
wyjściowa szerokość wirnika	$b_2 = 200 \text{ mm}$,
kąt łopatki na wylocie	$\beta_2 = 180^\circ$.

a) Dobór mocy silnika

Moc wentylatora w punkcie pracy — wzór (2) lub (3):

$$N_1 = \frac{\dot{V} \cdot \Delta p_c}{\eta_c} = \frac{2,22 \cdot 677}{0,70} = 2145 \text{ W}$$

$$N_1 = \frac{\dot{V} \cdot \Delta p_c}{102 \cdot \eta_c} = \frac{2,22 \cdot 69}{0,102 \cdot 0,7} = 2145 \text{ W}$$

Sprawność przekładni $\eta_p = 1$.

Przyrost mocy wynikający z tolerancji wykonania wentylatora — wzór (4)

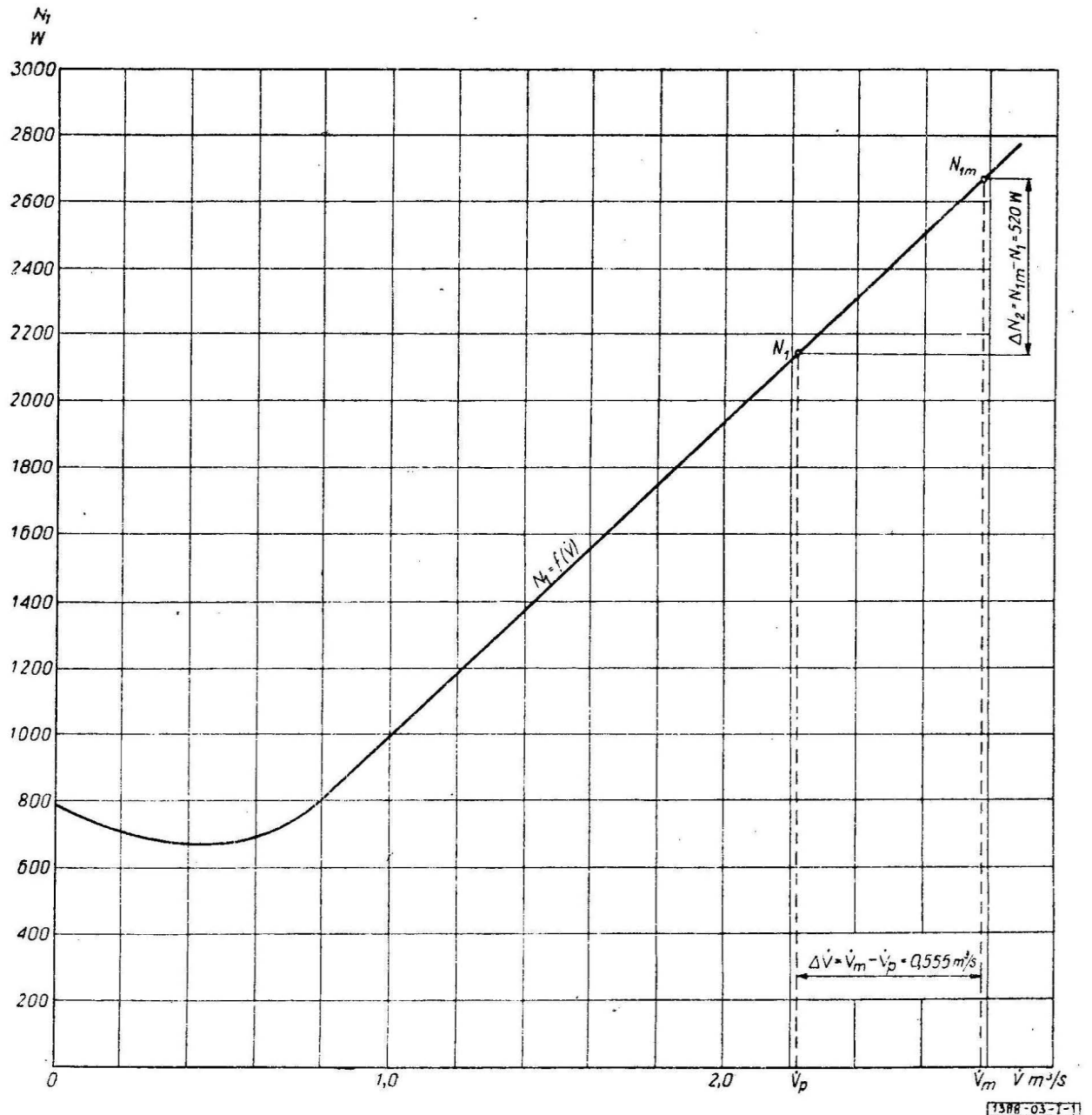
$$\Delta N_1 = K \cdot N_1 = 0,13 \cdot 2145 = 218 \text{ W}$$

$$K = 0,13 \text{ z tabl. 2 dla } N_1 = 1 \div 2,5 \text{ kW}$$

Przyrost mocy wynikający z pochylenia krzywej mocy wentylatora w funkcji jego wydajności $N_1 = f(\dot{V})$ znaleziono z wykresu charakterystyki wentylatora dla przyrostu wydajności $\Delta\dot{V} = \dot{V}_m - \dot{V}_p = 0,25 \cdot \dot{V}_p = 0,25 \cdot 2,22 = 0,555 \text{ m}^3/\text{s}$ (rys. I-1)

$$\Delta N_2 = N_{1m} - N_1 = 2665 - 2145 = 520 \text{ W}$$

trójfazowych dobrano silnik typu SZJe-48b o mocy znamionowej $N_N = 3,0 \text{ kW}$, prędkości obrotowej $n_N = 705 \text{ obr/min}$, krotności prądu rozruchowego $I_r/I_N = 5,4$, krotności momentu rozruchowego $M_r/M_N = 1,6$ i momencie zamachowym wirnika $GD_s^2 = 0,216 \text{ kG} \cdot \text{m}^2$.



Rys. I-1. Przewidywana krzywa mocy wentylatora w funkcji wydajności

Moc na wale silnika — wzór (1)

$$N_w = N_1 + \Delta N_1 + \Delta N_2 = 2145 + 218 + 520 = 2883 \text{ W}$$

b) Dobór rodzaju budowy silnika

Z uwagi na ogólne przeznaczenie wentylatora przyjęto, że wentylator będzie pracował w różnych warunkach otoczenia z wyjątkiem pomieszczeń niebezpiecznych pod względem ogniowym i wybuchowym. Z tabl. 3 wybrano więc silnik budowy zamkniętej Z ze stopniem ochrony IP44 i chłodzeniem naturalnym powierzchniowym (sposób chłodzenia B).

Przyjęto również, że temperatura otoczenia i wysokość w miejscu zainstalowania wentylatora mogą wynosić odpowiednio $+50^\circ\text{C}$ i 2000 m nad poziomem morza.

c) Dobór typu silnika z katalogu

Dla obliczonej mocy na wale $N_w = 2883 \text{ W}$ i wybranego rodzaju budowy silnika Z z katalogu silników indukcyjnych

d) Sprawdzenie rozruchu metodą uproszczoną

Całkowity moment zamachowy zespołu silnik-wentylator — wzór (13)

$$GD^2 = GD_s^2 + GD_w^2 \left(\frac{n_w}{n_N} \right)^2 = 0,216 + 5,5 \cdot 1 = 5,716 \text{ kG} \cdot \text{m}^2$$

Czas rozruchu — wzór (11)

$$t_r = 1,8 \cdot t_{st} \cdot \frac{GD^2}{GD_s^2} = 1,8 \cdot 0,15 \cdot \frac{5,716}{0,216} = 7,15 \text{ s}$$

Stała czasowa rozruchu silnika z tabl. 4 dla mocy silnika do 10 kW, rodzaju budowy Z i prędkości obrotowej 500 ÷ 1000 obr/min wynosi $t_{st} = 0,15 \text{ s}$.

Przyrost temperatury stojana silnika — wzór (15)

$$\Delta\theta = 5,5 \cdot i_N^2 \left(\frac{I_r}{I_N} \right)^2 t_r \cdot 10^{-3} = 5,5 \cdot 3,6^2 \cdot 5,4^2 \cdot 7,15 \cdot 10^{-3} = 14,8^\circ\text{C}$$

Przyjęto znamionową gęstość prądu $i_N = 3,6 \text{ A/mm}^2$.

Dopuszczalny przyrost temperatury dla izolacji klasy E (w której wykonywane są silniki typu SZJe) wg PN-65/E-06000 tabl. 4 wynosi 75°C . Z uwagi na przewidywaną wyższą temperaturę otoczenia ($+50^\circ\text{C}$) i wysokość zainstalowania przekraczającą 1000 m nad poziomem morza, przyrost ten należy skorygować wg wskazań PN-65/E-06000 p. 2.14.4.1 i 2.14.4.2:

— ze względu na wyższą temperaturę otoczenia dopuszczalny przyrost temperatury należy zmniejszyć o 10°C ,

— ze względu na większą wysokość zainstalowania dopuszczalny przyrost temperatury należy zmniejszyć o 10%, tj. o $7,5^\circ\text{C}$.

Dopuszczalny przyrost temperatury wyniesie więc

$$\Delta\vartheta_{\text{dop}} = 75 - 10 - 7,5 = 57,5^\circ\text{C}$$

Obliczony przyrost temperatury stojana $\Delta\vartheta = 14,8^\circ\text{C}$ jest więc znacznie mniejszy od dopuszczalnego przyrostu temperatury $\Delta\vartheta_{\text{dop}} = 57,5^\circ\text{C}$.

2. Przykład doboru silnika elektrycznego do napędu wentylatora promieniowego ogólnego przeznaczenia, napędzanego przez sprzęgło bez poślizgu.

Optymalne wielkości charakterystyczne pracy wentylatora są następujące:

wydajność	$\dot{V} = 13,9 \text{ m}^3/\text{s}$,
spiętrzenia całkowite	$\Delta p_c = 135 \text{ kG/m}^2 = 1322 \text{ N/m}^2$,
sprawność całkowita	$\eta_c = 0,80$,
prędkość obrotowa (kątowna)	$n = 735 \text{ obr/min}$ ($\omega = 77 \text{ rad/s}$),
gęstość czynnika	$\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$,
moment zamachowy wirnika	$GD_w^2 = 320 \text{ kG} \cdot \text{m}^2$,
moment bezwładności wirnika	$J_w = 80 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,
napięcie zasilania silnika	$U = 380 \text{ V}$.

Wielkości geometryczne wentylatora są następujące:

średnica zewnętrzna krawędzi spływu łopatek	$D_2 = 1400 \text{ mm}$,
wyjściowa szerokość wirnika	$b_2 = 325 \text{ mm}$,
kąt łopatki na wylocie	$\beta_2 = 32^\circ$.

a) Dobór mocy silnika

Moc wentylatora w punkcie pracy — wzór (2) lub (3):

$$N_1 = \frac{\dot{V} \cdot \Delta p_c}{\eta_c} = \frac{13,9 \cdot 1322}{0,80} = 23\,000 \text{ W}$$

$$N_1 = \frac{\dot{V} \cdot \Delta p_c}{0,102 \cdot \eta_c} = \frac{13,9 \cdot 135}{0,102 \cdot 0,80} = 23\,000 \text{ W}$$

Sprawność przekładni $\eta_p = 1$.

Przyrost mocy wynikający z tolerancji wykonania wentylatora — wzór (4)

$$\Delta N_1 = K \cdot N_1 = 0,105 \cdot 23\,000 = 2420 \text{ W}$$

$$K = 0,105 \text{ z tabl. 2 dla } N_1 = 10 \div 25 \text{ kW}$$

Przyrost mocy wynikający z pochylenia krzywej mocy wentylatora w funkcji wydajności $N_1 = f(\dot{V})$ — wzór (5) lub (8):

$$\Delta N_2 = \left(\Delta p_c - \frac{\rho \cdot \dot{V}_p \cdot u_2}{A_2} \text{ctg} \beta_2 \right) \cdot 0,25 \cdot \dot{V}_p =$$

$$= \left(1322 - \frac{1,2 \cdot 13,9 \cdot 53,8}{1,43} \cdot 1,6003 \right) \cdot 0,25 \cdot 13,9 = 1100 \text{ W}$$

$$u_2 = \frac{\pi \cdot D_2 \cdot n}{60} = \frac{\pi \cdot 1,4 \cdot 735}{60} = 53,8 \text{ m/s}$$

$$A_2 = \pi \cdot D_2 \cdot b_2 = \pi \cdot 1,4 \cdot 0,325 = 1,43 \text{ m}^2$$

$$\text{ctg} \beta_2 = \text{ctg} 32^\circ = 1,6003$$

Moc na wale silnika — wzór (1)

$$N_w = N_1 + \Delta N_1 + \Delta N_2 = 23\,000 + 2420 + 1100 = 26\,520 \text{ W}$$

b) Dobór rodzaju budowy silnika

Z uwagi na ogólne przeznaczenie wentylatora przyjęto, że wentylator będzie pracował w różnych warunkach otoczenia

z wyjątkiem pomieszczeń niebezpiecznych pod względem ogniowym i wybuchowym.

Z tabl. 3 wybrano więc silnik budowy zamkniętej Z ze stopniem ochrony IP44 i chłodzeniem naturalnym powierzchniowym (sposób chłodzenia B).

Przyjęto również, że temperatura otoczenia i wysokość w miejscu zainstalowania wentylatora nie przekroczą wartości odpowiednio $+40^\circ\text{C}$ i 1000 m nad poziomem morza.

c) Dobór typu silnika z katalogu

Dla obliczonej w poz. a) mocy na wale $N_w = 26\,520 \text{ W}$ i wybranego w poz. b) rodzaju budowy silnika Z z katalogu silników indukcyjnych trójfazowych dobrano silnik typu SZJe-88b o mocy znamionowej $N_N = 30 \text{ kW}$, prędkości obrotowej $n_N = 735 \text{ obr/min}$ ($\omega_N = 77 \text{ rad/s}$), krotności prądu rozruchowego $I_r/I_N = 5,5$, krotności momentu rozruchowego $M_r/M_N = 1,9$, momencie zamachowym wirnika $GD_s^2 = 6,1 \text{ kG} \cdot \text{m}^2$ ($J = 1,53 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$) i izolacji klasy E.

d) Sprawdzenie rozruchu metodą uproszczoną

Całkowity moment zamachowy zespołu silnik-wentylator, zredukowany do znamionowej prędkości obrotowej silnika — wzór (13)

$$GD^2 = GD_s^2 + GD_w^2 \left(\frac{n_w}{n_N} \right)^2 = 6,1 + 320 \left(\frac{735}{735} \right)^2 = 326,1 \text{ kG} \cdot \text{m}^2$$

Całkowity moment bezwładności zespołu silnik-wentylator — wzór (14)

$$J = J_s + J_w \left(\frac{\omega_w}{\omega_N} \right)^2 = 1,53 + 80 \left(\frac{77}{77} \right)^2 = 81,53 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Czas rozruchu — wzór (11) lub (12):

$$t_r = 1,8 \cdot t_{st} \cdot \frac{GD^2}{GD_s^2} = 1,8 \cdot 0,3 \cdot \frac{326,1}{6,1} = 28,8 \text{ s}$$

$$t_r = 1,8 \cdot t_{st} \cdot \frac{J}{J_s} = 1,8 \cdot 0,3 \cdot \frac{81,53}{1,53} = 28,8 \text{ s}$$

Stała czasowa rozruchu silnika z tabl. 4 dla mocy silnika $25 \div 50 \text{ kW}$, rodzaju budowy Z i prędkości obrotowej $500 \div 1000 \text{ obr/min}$ ($\omega = 52,3 \div 104,7 \text{ rad/s}$), wynosi $t_{st} = 0,3 \text{ s}$.

Przyrost temperatury stojana silnika — wzór (15)

$$\Delta\vartheta = 5,5 \cdot i_N^2 \left(\frac{I_r}{I_N} \right)^2 \cdot t_r \cdot 10^{-3} = 5,5 \cdot 3,6^2 \cdot 5,5^2 \cdot 28,8 \cdot 10^{-3} = 62,1^\circ\text{C}$$

Przyjęto znamionową gęstość prądu $i_N = 3,6 \text{ A/mm}^2$.

Dopuszczalny przyrost temperatury dla izolacji klasy E wg PN-65/E-06000 tabl. 4 wynosi 75°C . Obliczony przyrost temperatury stojana $\Delta\vartheta = 62,1^\circ\text{C}$ nie przekracza więc dopuszczalnego przyrostu temperatury.

3. Przykład doboru silnika elektrycznego do napędu wentylatora promieniowego przeznaczonego do młynów węglowych w elektrowniach ciepłych, napędzanego przez sprzęgło bez poślizgu i zainstalowanego w pomieszczeniu kotłowni (temperatura otoczenia $+40^\circ\text{C}$) na wysokości nie przekraczającej 1000 m nad poziomem morza.

Optymalne wielkości charakterystyczne pracy wentylatora są następujące:

wydajność	$\dot{V} = 13,6 \text{ m}^3/\text{s}$,
spiętrzenie całkowite	$\Delta p_c = 800 \text{ kG/m}^2 = 7850 \text{ N/m}^2$,
sprawność całkowita	$\eta_c = 0,76$,
prędkość obrotowa (kątowna)	$n = 1485 \text{ obr/min}$ ($\omega = 145,7 \text{ rad/s}$),
gęstość czynnika	$\rho = 0,593 \text{ kg/m}^3$,
moment zamachowy wirnika	$GD_w^2 = 1000 \text{ kG} \cdot \text{m}^2$,
moment bezwładności wirnika	$J_w = 250 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,
napięcie zasilania silnika	$U = 6000 \text{ V}$.

a) Dobór mocy silnika

Moc wentylatora w punkcie pracy — wzór (2) lub (3):

$$N_1 = \frac{\dot{V} \cdot \Delta p_c}{\eta_c} = \frac{13,6 \cdot 7850}{0,76} = 140\,500 \text{ W} = 140,5 \text{ kW}$$

$$N_1 = \frac{\dot{V} \cdot \Delta p_c}{0,102 \cdot \eta_c} = \frac{13,6 \cdot 800}{0,102 \cdot 0,76} = 140\,500 \text{ W} = 140,5 \text{ kW}$$

Sprawność przekładni $\eta_p = 1$.

Przyrost mocy wynikający z tolerancji wykonania wentylatora — wzór (4)

$$\Delta N_1 = K \cdot N_1 = 0,07 \cdot 140\,500 = 9830 \text{ W} = 9,83 \text{ kW}$$

$$K = 0,07 \text{ z tabl. 2 dla } N_1 = 100 \div 200 \text{ kW.}$$

Przyrost mocy wynikający z pochylenia krzywej mocy wentylatora w funkcji jego wydajności $N_1 = f(\dot{V})$ znaleziono z wykresu charakterystyki wentylatora dla przyrostu wydajności $\Delta \dot{V} = \dot{V}_m - \dot{V}_p = 0,25 \cdot \dot{V}_p = 0,25 \cdot 13,6 = 3,4 \text{ m}^3/\text{s}$ (rys. I-2)

$$\Delta N_2 = N_{1m} - N_1 = 161 - 140,5 = 20,5 \text{ kW.}$$

Moc na wale silnika — wzór (1)

$$N_w = N_1 + \Delta N_1 + \Delta N_2 = 140,5 + 9,83 + 20,5 = 170,83 \text{ kW.}$$

b) Dobór rodzaju budowy silnika

Z tabl. 3 dla pomieszczenia z pyłem dobrano silnik budowy zamkniętej Z ze stopniem ochrony IP44 i chłodzeniem naturalnym powierzchniowym (sposób chłodzenia B).

c) Dobór typu silnika z katalogu

Z katalogu silników indukcyjnych trójfazowych dobrano dla mocy na wale $N_w = 170,83 \text{ kW}$ najbliższy silnik typu SZDc-174e o mocy znamionowej $N_N = 200 \text{ kW}$, prędkości obrotowej $n_N = 1485 \text{ obr/min}$, krotności prądu rozruchowego $I_r/I_N = 6,0$, krotności momentu rozruchowego $M_r/M_N = 1,6$, krotności momentu maksymalnego $M_{\max}/M_N = 2,0$ i momencie zamachowym wirnika $GD_s^2 = 65 \text{ kG} \cdot \text{m}^2$.

d) Sprawdzenie rozruchu metodą dokładną

Moment znamionowy silnika — wzór (16)

$$M_N = 975 \frac{N_N}{n_N} = 975 \frac{200}{1485} = 131,4 \text{ kG} \cdot \text{m}$$

Moment oporowy wentylatora — wzór (18)

$$M_o = k_1 \cdot M_N + k_2 \cdot M_N \left(\frac{n}{n_N} \right)^2 = 0,05 \cdot 131,4 + 0,95 \cdot 131,4 \frac{n^2}{1485^2} = 6,55 + 5,65 \cdot 10^{-5} \cdot n^2 \text{ kG} \cdot \text{m}$$

Przyjęto:

$$k_1 = 0,05,$$

$$k_2 = 0,95.$$

Moment przyspieszający (dynamiczny) zespołu silnik-wentylator znajduje się z wykresu na rys. I-3 przedstawiającego przebieg momentu obrotowego silnika i przebieg momentu oporowego wentylatora w funkcji prędkości obrotowej [$M_s = f(n)$ i $M_o = f(n)$].

Dzieląc zakres prędkości obrotowej od $n = 0$ do $n_N = 1485 \text{ obr/min}$ na parzystą liczbę równych odcinków, np. 6 odcinków po $247,6 \text{ obr/min}$ i stosując całkowanie numeryczne wg metody Simpsona, otrzymano następujące wartości średnie momentu obrotowego silnika $M_{s, \text{sr}}$ i momentu oporowego wentylatora $M_{o, \text{sr}}$:

$$M_{s, \text{sr}} = \frac{1}{6 \cdot k} [y_0 + 4y_{1/2} + 2y_1 + 4y_{3/2} + 2y_2 + 4y_{5/2} + 2y_3 + 4y_{7/2} + 2y_4 + 4y_{9/2} + 2y_5 + 4y_{11/2} + y_6] =$$

$$= \frac{1}{6 \cdot 6} (210 + 4 \cdot 199 + 2 \cdot 191 + 4 \cdot 183 + 2 \cdot 180 +$$

$$+ 4 \cdot 186 + 4 \cdot 217 + 2 \cdot 235 + 4 \cdot 251 + 2 \cdot 262 +$$

$$+ 4 \cdot 244 + 131) = \frac{7583}{36} = 210,5 \text{ kG} \cdot \text{m}$$

$$M_{o, \text{sr}} = \frac{1}{6 \cdot k} [y'_0 + 4y'_{1/2} + 2y'_1 + 4y'_{3/2} + 2y'_2 + 4y'_{5/2} + 2y'_3 +$$

$$+ 4y'_{7/2} + 2y'_4 + 4y'_{9/2} + 2y'_5 + 4y'_{11/2} + y'_6] =$$

$$= \frac{1}{6 \cdot 6} (39 + 4 \cdot 8 + 2 \cdot 11 + 4 \cdot 15 + 2 \cdot 21 + 4 \cdot 29 +$$

$$+ 2 \cdot 38 + 4 \cdot 49 + 2 \cdot 62 + 4 \cdot 77 + 2 \cdot 93 + 4 \cdot 111 +$$

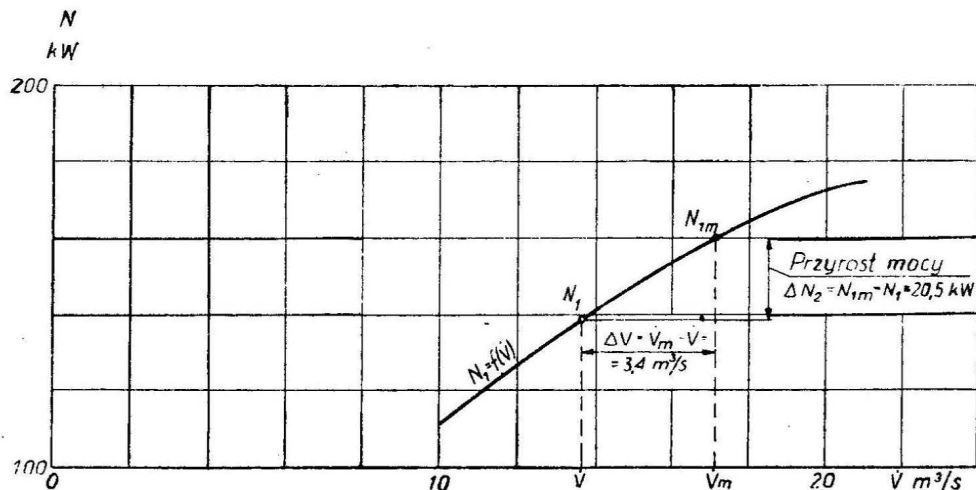
$$+ 131) = \frac{1776}{36} = 49,3 \text{ kG} \cdot \text{m}$$

Średni moment przyspieszający dynamiczny — wzór (20)

$$M_d = 0,81 \cdot M_{s, \text{sr}} - M_{o, \text{sr}} = 0,81 \cdot 210,5 - 49,3 = 121,2 \text{ kG} \cdot \text{m}$$

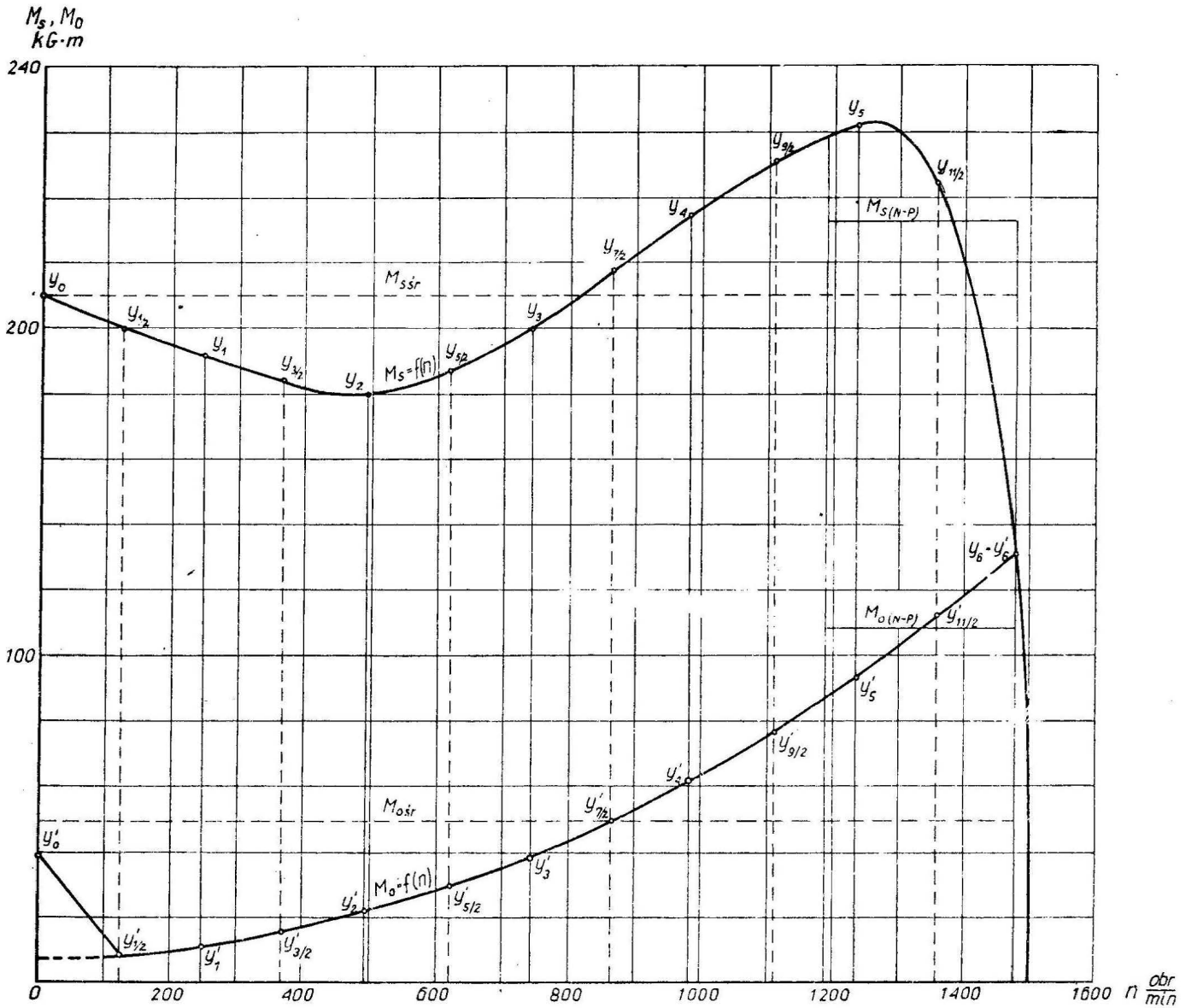
Całkowity moment zamachowy zespołu silnik-wentylator — wzór (13)

$$GD^2 = GD_s^2 + GD_w^2 \left(\frac{n_w}{n_N} \right)^2 = 65 + 1000 \cdot 1 = 1065 \text{ kG} \cdot \text{m}^2$$



1388-03-I-2

Rys. I-2. Krzywa mocy użytecznej wentylatora w funkcji wydajności, uzyskana z pomiarów wentylatora modelowego



Rys. I-3. Przebieg momentu obrotowego silnika w funkcji prędkości obrotowej $M_s = f(n)$ i przebieg momentu oporowego wentylatora w funkcji prędkości obrotowej $M_o = f(n)$

Czas rozruchu zespołu silnik-wentylator — wzór (21)

$$t_r = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{n_N}{M_d} = \frac{1065}{375} \cdot \frac{1485}{121,2} = 34,8 \text{ s}$$

Przyrost temperatury stojana silnika — wzór (15)

$$\Delta\theta = 5,5 \cdot i_N^2 \cdot \left(\frac{I_r}{I_N}\right)^2 \cdot t_r \cdot 10^{-3} = 5,5 \cdot 3,6^2 \cdot 6^2 \cdot 34,8 \cdot 10^{-3} = 89,3^\circ\text{C}$$

Przyjęto znamionową gęstość prądu $i_N = 3,6 \text{ A/mm}^2$.

Z PN-65/E-06000 tabl. 4 wynika, że silnik powinien mieć klasę izolacji F, dla której dopuszczalny przyrost temperatury wynosi $\Delta\theta_{dop} = 100^\circ\text{C}$.

e) Sprawdzenie samorozruchu

Średni moment obrotowy silnika $M_s(N-p)$ i średni moment oporowy wentylatora $M_o(N-p)$ w zakresie prędkości obrotowej od n_p do n_N wyznaczono jak w przypadku sprawdzania rozruchu, stosując metodę Simpsona całkowania numerycznego. Odpowiednie wartości średnich momentów przy $n_p = 0,8 \cdot n_N = 0,8 \cdot 1485 = 1188 \text{ obr/min}$ wynoszą:

- średni moment obrotowy silnika $M_s(N-p) = 232,8 \text{ kG} \cdot \text{m}$,
- średni moment oporowy wentylatora $M_o(N-p) = 107,5 \text{ kG} \cdot \text{m}$.

Przyjmując napięcie samorozruchu $U_{sr} = 0,78 \cdot U_N$, otrzymujemy następujący średni moment przyspieszający dynamiczny samorozruchu — wzór (27)

$$M_d(N-p) = M_s(N-p) \left(\frac{U_{sr}}{U_N}\right)^2 - M_o(N-p) = 232,8 \cdot 0,78^2 - 107,5 = 34,3 \text{ kG} \cdot \text{m}$$

Czas samorozruchu — wzór (25)

$$t_{sr} = \frac{GD^2(n_N - n_p)}{375 \cdot M_d(N-p)} = \frac{1065(1485 - 1188)}{375 \cdot 34,5} = 24,7 \text{ s}$$

Przyrost temperatury stojana silnika ponad temperaturę ustaloną przed zadziałaniem urządzenia do samoczynnego załączenia rezerwy — wzór (28)

$$\Delta\theta_{sr} = 6,8 \cdot i_N^2 \left[\left(\beta \frac{U_{sr} \cdot I_r}{U_N \cdot I_N} \right)^2 - 1 \right] \cdot t_{sr} \cdot 10^{-3} = 6,8 \cdot 3,6^2 \cdot [(0,6 \cdot 0,78 \cdot 6)^2 - 1] \cdot 24,7 \cdot 10^{-3} = 15^\circ\text{C} < 16^\circ\text{C}$$

Przyjęto:

- $i_N = 3,6 \text{ A/mm}^2$,
- $\beta = 0,6$.

Z powyższego wynika, że przyrost temperatury przy samorozruchu nie przekracza dopuszczalnego przyrostu temperatury $\Delta\theta_{sr, dop} = 16^\circ\text{C}$ w przypadku, gdy napięcie samorozruchu nie spadnie poniżej wartości $U_{sr} = 0,78 \cdot U_N = 0,78 \cdot 6000 = 4680 \text{ V}$.

4. Przykład doboru silnika elektrycznego do napędu wentylatora osiowego napędzanego poprzez sprzęgło bez poślizgu i przeznaczonego jako wentylator powietrza (podmuchowy do kotła).

Optymalne wielkości charakterystyczne pracy wentylatora są następujące:

wydajność	$\dot{V} = 52,8 \text{ m}^3/\text{s}$,
spiętrzenie całkowite	$\Delta p_c = 980 \text{ kG/m}^2 = 9620 \text{ N/m}^2$,
sprawność całkowita	$\eta_c = 0,78$,
prędkość kątowna	$\omega = 156 \text{ rad/s}$,
moment bezwładności wirnika	$J_w = 374 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,
napięcie zasilania	$U = 6000 \text{ V}$,
gęstość czynnika	$\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$.

a) Dobór mocy silnika

Moc wentylatora w punkcie pracy — wzór (2)

$$N_1 = \frac{\dot{V}_p \cdot \Delta p_c}{\eta_c} = \frac{52,8 \cdot 9620}{0,78} = 652\,000 \text{ W} = 652 \text{ kW}$$

Sprawność przekładni $\eta_p = 1$.

Przyrost mocy wynikający z tolerancji wykonania wentylatora — wzór (4)

$$\Delta N_1 = K \cdot N_1 = 0,06 \cdot 652\,000 = 39\,100 \text{ W} = 39,1 \text{ kW}$$

$$K = 0,06 \text{ z tabl. 2 dla } N_1 > 200 \text{ kW}$$

Przyrost mocy wynikający z pochylenia krzywej mocy wentylatora w funkcji jego wydajności $N_1 = F(\dot{V})$ pominięto z uwagi na opadającą charakterystykę mocy ze wzrostem wydajności.

Moc na wale silnika — wzór (1)

$$N_w = N_1 + \Delta N_1 = 652 + 39,1 = 691,1 \text{ kW}$$

b) Dobór rodzaju budowy silnika

Z tabl. 3 dla pomieszczenia z pyłem (kotłownia) dobrano silnik budowy zamkniętej Z ze stopniem ochrony IP44 i chłodzeniem wewnętrznym własnym (sposób chłodzenia A).

Przyjęto, że temperatura otoczenia i wysokość w miejscu zainstalowania nie przekroczą odpowiednio $+40^\circ\text{C}$ i 1000 m nad poziomem morza.

c) Dobór typu silnika z katalogu

Z katalogu silników indukcyjnych trójfazowych dobrano dla mocy na wale $N_w = 691,1 \text{ kW}$ silnik typu SZDr 134s o mocy znamionowej $N_N = 800 \text{ kW}$, prędkości obrotowej $n_N = 1490 \text{ obr/min}$ ($\omega_N = 156 \text{ rad/s}$), krotności prądu rozruchowego $I_r/I_N = 4,5$, krotności momentu rozruchowego $M_r/M_N = 0,9$, przeciążalności momentu $M_{max}/M_N = 1,9$ oraz momencie zamachowym wirnika $GD_s^2 = 265 \text{ kG} \cdot \text{m}^2$ ($J_s = 66,3 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$).

d) Sprawdzenie rozruchu metodą dokładną

Moment znamionowy silnika — wzór (17)

$$M_N = 1000 \frac{N_N}{\omega_N} = 1000 \frac{800}{156} = 5130 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Moment oporowy wentylatora — wzór (19)

$$M_o = k_1 \cdot M_N + k_2 \cdot M_N \left(\frac{\omega}{\omega_N} \right)^2 = 0,05 \cdot 5130 + 0,95 \cdot 5130 \left(\frac{\omega}{156} \right)^2 = 256,5 + 0,2 \cdot \omega^2 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Przyjęto:

$$k_1 = 0,05,$$

$$k_2 = 0,95.$$

Moment przyspieszający (dynamiczny) zespołu silnik-wentylator znaleziono z wykresu na rys. I-4 przedstawiającego przebieg momentu obrotowego dobranego silnika i przebieg momentu oporowego wentylatora w funkcji prędkości kątowej silnika: $M_s = f(\omega)$ i $M_o = f(\omega)$.

Dzielnik zakres prędkości kątowej od $\omega = 0$ do $\omega_N = 156 \text{ rad/s}$ na 6 równych odcinków po 26 rad/s i stosując całkowanie numeryczne wg metody trapezów, otrzymano następujące wartości średnie momentu obrotowego silnika $M_{s, sr}$ i momentu oporowego wentylatora $M_{o, sr}$:

$$M_{s, sr} = \frac{1}{2 \cdot k} [y_0 + 2y_1 + 2y_2 + 2y_3 + 2y_4 + 2y_5 + y_6] =$$

$$= \frac{1}{2 \cdot 6} [4620 + 2 \cdot 4370 + 2 \cdot 4240 + 2 \cdot 5700 + 2 \cdot 8350 + 2 \cdot 9750 + 5130] = \frac{74570}{12} = 6214 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$M_{o, sr} = \frac{1}{2 \cdot k} [y'_0 + 2y'_1 + 2y'_2 + 2y'_3 + 2y'_4 + 2y'_5 + y'_6] =$$

$$= \frac{1}{2 \cdot 6} [1540 + 2 \cdot 400 + 2 \cdot 800 + 2 \cdot 1500 + 2 \cdot 2420 + 2 \cdot 3620 + 5130] = \frac{24150}{12} = 2012,5 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Średni moment przyspieszający (dynamiczny) — wzór (20)

$$M_d = 0,81 \cdot M_{s, sr} - M_{o, sr} = 0,81 \cdot 6214 - 2012,5 = 3017,5 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Całkowity moment bezwładności zespołu silnik-wentylator — wzór (14)

$$J = J_s + J_w \left(\frac{\omega_w}{\omega_N} \right)^2 = 66,3 + 374 \cdot 1 = 440,3 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Czas rozruchu zespołu silnik-wentylator — wzór (22)

$$t_r = \frac{J \cdot \omega_N}{M_d} = \frac{440,3 \cdot 156}{3017,5} = 22,8 \text{ s}$$

Przyrost temperatury stojana silnika — wzór (15)

$$\Delta\theta = 5,5 \cdot i_N^2 \left(\frac{I_r}{I_N} \right)^2 \cdot t_r \cdot 10^{-3} = 5,5 \cdot 3,5^2 \cdot 4,5^2 \cdot 22,8 \cdot 10^{-3} = 31,05^\circ\text{C}$$

Przyjęto znamionową gęstość prądu $i_N = 3,5 \text{ A/mm}^2$.

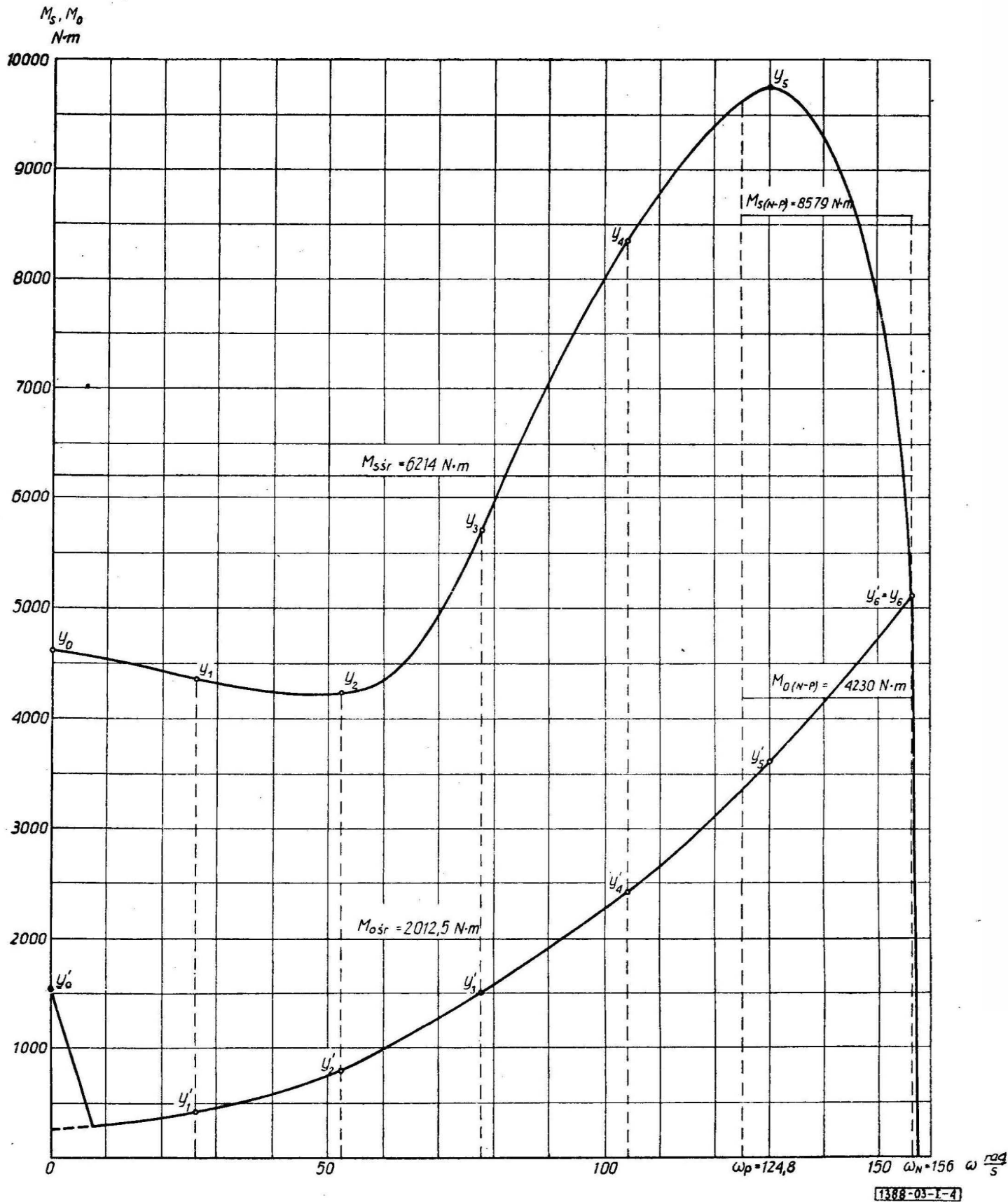
Z PN-72/E-06000 tabl. 3 wynika, że obliczony przyrost temperatury $\Delta\theta = 31,05^\circ\text{C}$ nie przekracza dopuszczalnego przyrostu temperatury dla izolacji klasy A.

e) Sprawdzenie samorozruchu

Średni moment obrotowy silnika $M_{s, (N-p)}$ i średni moment oporowy wentylatora $M_{o, (N-p)}$ w zakresie prędkości kątowej od ω_p do ω_N , wyznaczono z wykresu na rys. I-4 w sposób analogiczny jak w przypadku sprawdzania rozruchu, stosując metodę całkowania numerycznego wg trapezów. Odpowiednie wartości średnich momentów przy przyjęciu $\omega_p = 0,8 \cdot \omega_N = 0,8 \cdot 156 = 124,8 \text{ rad/s}$ wynoszą:

$$\text{— średni moment obrotowy silnika } M_{s, (N-p)} = 8579 \text{ N} \cdot \text{m},$$

$$\text{— średni moment oporowy wentylatora } M_{o, (N-p)} = 4230 \text{ N} \cdot \text{m}.$$



Rys. I-4. Przebieg momentu obrotowego silnika w funkcji prędkości kątowej $M_s = f(\omega)$ i momentu oporowego wentylatora w funkcji prędkości kątowej $M_o = f(\omega)$

Przyjmując napięcie samorozruchu $U_{sr} = 0,75 \cdot U_N$, otrzymujemy następujący średni moment przyspieszający (dynamiczny) samorozruchu — wzór (27)

$$M_d(N-p) = M_s(N-p) \left(\frac{U_{sr}}{U_N} \right)^2 - M_o(N-p) = 8579 \cdot 0,75^2 - 4230 = 595 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Czas samorozruchu — wzór (26)

$$t_{sr} = \frac{J(\omega_N - \omega_p)}{M_d(N-p)} = \frac{440,3(156 - 124,8)}{595} = \frac{440,3 \cdot 31,2}{595} = 23,1 \text{ s}$$

Przyrost temperatury stojana silnika ponad temperaturę ustaloną przed zadziałaniem urządzenia do samoczynnego załączania rezerwy — wzór (28)

$$\begin{aligned} \Delta \vartheta_{sr} &= 6,8 \cdot i_N^2 \left[\left(\frac{\beta \cdot U_{sr} \cdot I_r}{U_N \cdot I_N} \right)^2 - 1 \right] \cdot t_{sr} \cdot 10^{-3} = \\ &= 6,8 \cdot 3,5^2 [(0,7 \cdot 0,75 \cdot 4,5)^2 - 1] 23,1 \cdot 10^{-3} = \\ &= 8,84^\circ\text{C} < 16^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Przyjęto:

$$i_N = 3,5 \text{ A/mm}^2$$

$$\beta = 0,7.$$

Przyrost temperatury przy samorozruchu nie przekracza dopuszczalnego przyrostu temperatury $\Delta \vartheta_{sr \text{ dop}} = 16^\circ\text{C}$.

5. Uwagi do wydania II

Uaktualniono normy związane.