

Stanovení akustického výkonu elektrických strojů podle ČSN a podle ISO

Článek se zabývá porovnáním rozdílů mezi metodami ČSN 01 1604 a ISO 1680/1 pro stanovení akustického výkonu elektrických strojů. V teoretické části a zejména na výsledcích měření je prokázáno, že při použití kterékoliv z uvedených metod se dosahuje shodných výsledků. Článek současně upozorňuje i na podmínky, které je nutné dodržet k získání správných výsledků.

1. Úvod

Hladina akustického výkonu elektrických strojů patří k nejdůležitějším vlastnostem, podle kterých je hodnocena jejich jakost. Pro měření akustického výkonu platí v ČSSR z hlediska měřicí metodiky ČSN 01 1604 — [1]. Při exportu elektrických strojů zvláště do západních států je však třeba postupovat podle normy ISO 1680/1 — [2]. Odlišnost těchto norm spočívá v různém uspořádání měřicích ploch, a tím i poloh měřicího mikrofону na těchto plochách.

Z výsledků měření v provozních podmínkách zkušeben výrobních závodů vyplývá, že stanovená hladina akustického výkonu určená první z uvedených metodik se může lišit od hodnoty určené druhou z nich. Cílem příspěvku je zdůvodnit na základě teoretických znalostí případné rozdíly výsledků měření provedených pomocí výše uvedených metodik a dokladovat je vhodně zvoleným experimentem na reálném stroji.

2. Teoretické základy

Akustický výkon vyzářený elementem plochy dS ve směru kolmém na tuto plochu lze podle obr. 1. vyjádřit rovnicí

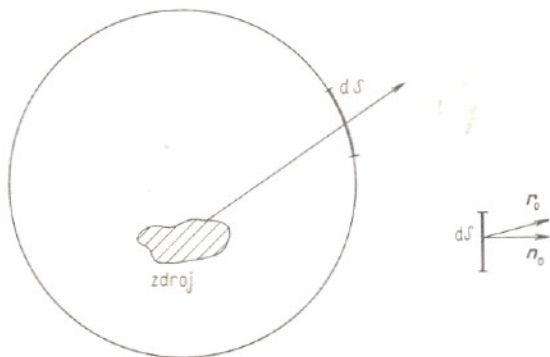
$$dP = pu \, dS(\mathbf{r}_0 \cdot \mathbf{n}_0) \quad (\text{W}; \text{Pa}, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}, \text{m}^2) \quad (1)$$

kde p je akustický tlak (Pa),
 u akustická rychlost ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$).

Vztah (1) je možné přepsat na

$$dP = pu \, dS \, n_0 = pu \, dS \quad (2)$$

Veličina pu je vektor okamžité akustické intenzity



Obr. 1. Vyzářování akustického výkonu zdrojem
 \mathbf{r}_0 je jednotkový vektor ve směru šíření vlny, \mathbf{n}_0 normálový vektor elementu plochy dS

vyzařování. Celkový vyzářený akustický výkon (nazývaný také okamžitý akustický výkon) bude

$$P = \iint_S pu \, dS \quad (3)$$

Protože při měření neregistrujeme okamžitou hodnotu, ale hodnotu průměrovanou v čase, můžeme psát

$$P_{av} = \iint_S (pu)_{av} \, dS \quad (4)$$

kde veličinu $(pu)_{av}$ označujeme jako vektor akustické intenzity

$$\mathbf{I} = (pu)_{av} \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}; \text{Pa}, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}) \quad (5)$$

(Index av označuje průměrnou hodnotu.) Mezi akustickým tlakem a akustickou rychlostí platí vztah na základě aproximované Eulerovy rovnice

$$\mathbf{u} = \frac{1}{\rho} \int \text{grad} p \, dt \quad (\text{m} \cdot \text{s}^{-1}) \quad (6)$$

V harmonické aproximaci lze pak vztah (6) přepsat do tvaru

$$\mathbf{u} = -\frac{j}{\rho c} \text{grad} p \quad (7)$$

kde ρ je hustota ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$),
 k vlnové číslo (m^{-1}),
 c rychlost zvuku ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$),
 j imaginární jednotka ($-$).

Aproximace pro případ vzdáleného akustického pole znamená, že v něm jsou akustický tlak a akustická rychlost ve fázi a platí přitom mezi nimi vztah

$$u_r|_{r \rightarrow \infty} = \frac{p}{\rho c} \quad (\text{m} \cdot \text{s}^{-1}) \quad (8)$$

Pro akustickou intenzitu přibližně platí

$$|\mathbf{I}|_{r \rightarrow \infty} = \frac{p^2}{\rho c} \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (9)$$

Vztah (9) je základním vztahem pro běžné určení hladiny akustického výkonu vyzářovaného zdrojem.

Zvolíme-li vhodně referenční hodnoty $I_0 = 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ a $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$, platí pro normální atmosférické podmínky rovnice

$$\frac{I}{I_0} = \left(\frac{p}{p_0}\right)^2 \frac{414}{\rho c} \approx \left(\frac{p}{p_0}\right)^2 \quad (10)$$

a po přechodu na vhodnější decibelovou stupnici dostáváme konečně pro hladinu akustické intenzity L_I (dB) a hladinu akustického tlaku L_p (dB) přibližně $L_I \approx L_p$.

Je-li velikost zvolené měřicí plochy S (m^2) a je-li střední hodnota hladiny akustického tlaku na měřicí ploše L_p (dB), je hladina akustického výkonu L_P (dB) dána vztahem

$$L_P = L_p + 10 \log \frac{S}{S_0} \quad (\text{dB}) \quad (11)$$

kde S je povrch měřicí plochy (m^2),
 S_0 referenční plocha, zpravidla 1 m^2 .

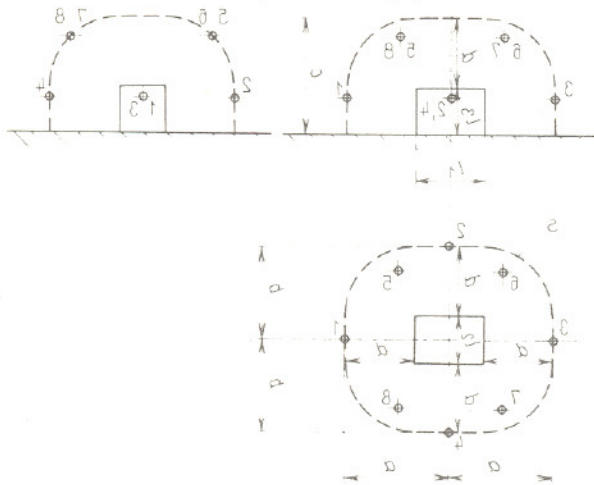
Platnost uvedeného výrazu je pro měření v praxi omezena následujícími požadavky:

- měření nelze provádět v blízkém akustickém poli, kde akustický tlak není ve fázi s akustickou rychlostí,
- v okolí měřeného zdroje nesmějí být jiné zdroje, které by mohly ovlivnit měření (tento požadavek v sobě zahrnuje vlastně i specifikaci hluku pozadí),
- měřený zdroj nesmí být umístěn v takovém prostoru, aby akustické vlny odražené od stěn a stropu výrazně ovlivňovaly měření.

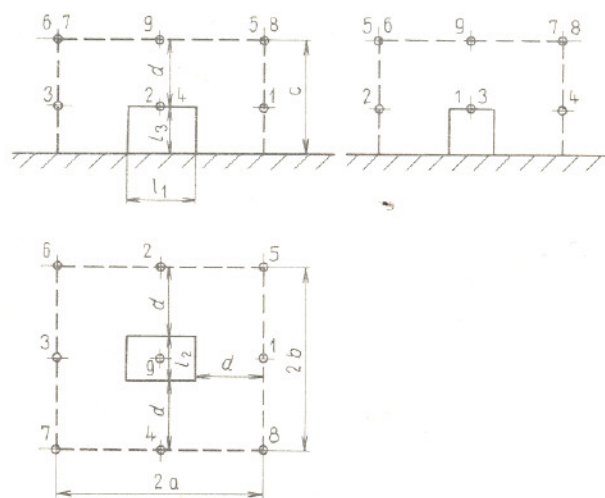
3. Vzájemné porovnání norem ČSN 01 1604 a ISO 1680/1

Pro stanovení hladiny akustického výkonu elektrického stroje platí ČSN 01 0019, část 01 — [3]. Tato norma specifikuje podmínky pro uložení a provoz stroje během zkoušení a jako jeden z možných způsobů určuje metodiku měření obsaženou v ČSN 01 1604. Jde o stanovení hladiny akustického výkonu hluku strojů ve volném zvukovém poli nad rovinou odražející zvuk. V normě jsou uvedeny charakteristické rozměry měřicí plochy prezentované na obr. 2 ve tvarech

$$\begin{aligned} a &= 0,5 l_1 + d \quad (\text{m}) \\ b &= 0,5 l_2 + d \quad (\text{m}) \\ c &= l_3 + d \quad (\text{m}) \end{aligned} \quad (12)$$



Obr. 2. Měřicí plocha podle ČSN 01 1604



Obr. 3. Měřicí plocha podle ISO 1680/1

kde l_1, l_2, l_3 jsou charakteristické rozměry stroje a d je měřicí vzdálenost — zpravidla 1 m. Měřicí místa leží v rovinách ve výšce $h_1 = 0,25(b + c - d)$ a $h_2 = 0,75(b + c - d)$. Plošný obsah měřicí plochy se určí v tomto případě ze vztahu

$$S = 4(ab + ac + bc) \frac{a + b + c}{a + b + c + 2d} \quad (\text{m}^2) \quad (13)$$

Mezinárodní normalizace uvádí v dokumentu ISO 1680/1 umístění měřicích bodů na kvádru, který je uveden na obr. 3. Rozměry měřicí plochy jsou totožné s výrazy uvedenými v ČSN 01 1604, avšak měřicí body jsou umístěny ve dvou rovinách $h_1 = 0,5c$ a $h_2 = c$. Plošný obsah měřicí plochy je dán v tomto případě výrazem

$$S = 4(ab + ac + bc) \quad (\text{m}^2) \quad (14)$$

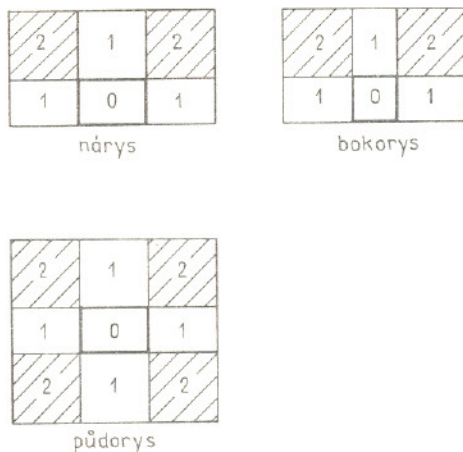
Z uvedeného je zřejmý rozdíl v umístění měřicích míst na měřicích plochách. Zatímco v ČSN 01 1604 sledují měřicí místa vlastně obrys měřeného stroje v konstantní vzdálenosti, vzdálenost měřicích míst od stroje podle ISO 1680/1 se zvyšuje až na hodnotu $\sqrt{3d}$.

Měřicí plochu kvádru lze tak rozdělit na dílčí plochy, jež jsou schematicky v nárysu, bokorysu a půdo-

Tab. 1. Pokles hladiny akustického tlaku na měřicí ploše podle ISO 1680/1

Korekce na ploše prvního typu (dB)										
X (m)	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
δ (dB)	-0,04	-0,17	-0,37	-0,64	-0,97	-1,34	-1,73	-2,15	-2,58	-3,01

Korekce na ploše druhého typu (dB)										
X (m) =	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
Y (m) = 0,10	-0,09	-0,21	-0,41	-0,68	-1,00	-1,37	-1,76	-2,17	-2,60	-3,03
0,20	-0,21	-0,33	-0,53	-0,79	-1,11	-1,46	-1,85	-2,25	-2,67	-3,10
0,30	-0,41	-0,53	-0,72	-0,97	-1,27	-1,61	-1,99	-2,38	-2,79	-3,20
0,40	-0,68	-0,79	-0,97	-1,21	-1,49	-1,82	-2,17	-2,55	-2,94	-3,34
0,50	-1,00	-1,11	-1,27	-1,49	-1,76	-2,07	-2,41	-2,76	-3,14	-3,52
0,60	-1,37	-1,46	-1,61	-1,82	-2,07	-2,36	-2,67	-3,01	-3,36	-3,73
0,70	-1,76	-1,85	-1,99	-2,17	-2,41	-2,67	-2,97	-3,28	-3,62	-3,96
0,80	-2,17	-2,25	-2,38	-2,55	-2,76	-3,01	-3,28	-3,58	-3,89	-4,22
0,90	-2,60	-2,67	-2,79	-2,94	-3,14	-3,36	-3,62	-3,89	-4,18	-4,49
1,00	-3,03	-3,10	-3,20	-3,34	-3,52	-3,73	-3,96	-4,22	-4,49	-4,77



Obr. 4. Schematické znázornění dílčích ploch 0, 1, 2

rysu znázorněny na obr. 4. Přitom číslicí 0 jsou označeny části měřicí plochy, které mají skutečně konstantní vzdálenost — zpravidla 1 m — od měřeného stroje. Číslicí 1 jsou označeny plochy s nárůstem vzdálenosti od zdroje až na hodnotu $\sqrt{2}d$ a číslicí 2 plochy, které dosahují až vzdálenosti $\sqrt{3}d$.

Uvažujeme-li u měřeného stroje všesměrové rovnoměrné vyzařování, potom hladina akustického tlaku na plochách označených 0 bude konstantní. Na plochách označených číslicí 1 bude pokles hladiny akustického tlaku δ s rostoucí vzdáleností od plochy 0 až po její okraj takový, jak je uvedeno v tab. 1 pro korekci na ploše prvního typu. Výpočet byl proveden pro vzdálenost $d = 1$ m a za předpokladu teoretického poklesu hladiny akustického tlaku s rostoucí vzdáleností podle vztahu

$$\delta = 20 \log \frac{r_x}{r_0} \quad (\text{dB}) \quad (15)$$

kde r_x je nově uvažovaná vzdálenost,

r_0 je původní referenční vzdálenost měřicího místa od zdroje zvuku.

Hodnota poklesu δ pro plochu označenou číslicí 2 je v tab. 2 uvedena jako korekce na ploše druhého typu. Z výsledků je zřejmé, že na ploše prvního typu může dojít k poklesu hladiny akustického tlaku až o 3,01 dB, zatímco u plochy druhého typu činí tento pokles dokonce 4,77 dB.

Uvedené skutečnosti je nutné plně respektovat v numerické integraci při výpočtu celkového akustického výkonu zdroje.

4. Výsledky experimentu

K ověření předcházejících úvah byl pro měření hladiny akustického výkonu vytipován asynchronní motor F 280M04-110, 100 kW, 1480 min⁻¹, výrobek MEZ Frenštát. Základní rozměry tohoto motoru jsou $l_1 = 0,837$ m, $l_2 = 0,570$ m, $l_3 = 0,686$ m. Měření bylo provedeno ve velké hale zkušebny VÚES Brno. Měře-

Tab. 2. Naměřené hladiny zvuku L_A (dBA)

Metoda měření	Označení měřicího místa									Průměrná hodnota
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
ČSN 01 1604	81,5	82	81	82,5	82	82	82	83,5	—	82,1
ISO 1680/1	80,5	80,5	81	83,5	78,5	78,5	79	80	83	80,5

ny byly hladiny zvuku L_A v měřicích místech určených podle ČSN 01 1604, popř. ISO 1680/1, pro vzdálenost $d = 1$ m. Hladina zvuku L_A je totožná s hladinou akustického tlaku, dosud prezentovanou v našich úvahách. Představuje totiž vážený součet příslušných hladin akustického tlaku v celém slyšitelném frekvenčním pásmu.

Pro měření byl použit frekvenční analyzátor Ba K 2120 a kondenzátorový mikrofon Ba K 4145. Hodnoty takto naměřených hladin zvuku L_A pro obě použité metodiky jsou uvedeny v tab. 2.

Pro přepočítání z průměrné hladiny zvuku L_A na odpovídající hodnotu hladiny akustického výkonu L_{PA} je nutné určit korekci podle vztahu (13), popř. (14), danou výrazem (11), tj. $K = 10 \log \frac{S}{S_0}$. Tato korekce pro ČSN 01 1604 činí 12,4 dB, pro ISO 1680/1 je 14,1 dB.

Výsledná hladina akustického výkonu L_{PA} určená podle vztahu (11) bude tedy pro obě použité metodiky následující:

$$\text{ČSN 01 1604: } L_{PA} = 82,1 + 12,4 = 94,5 \text{ dBA}$$

$$\text{ISO 1680/1: } L_{PA} = 80,5 + 14,1 = 94,6 \text{ dBA}$$

Hodnoty takto určené jsou téměř stejné a potvrzují správnost obou použitých metod měření při dodržení požadavků na měření uvedených v druhé části práce.

5. Závěr

Práce uvádí výsledky teoretického rozboru a následného experimentu vedených se záměrem upozornit na rozdíly v měřicí metodice při určování hladiny akustického výkonu stroje podle ČSN 01 1604 a ISO 1680/1.

Hladina akustického výkonu elektrického stroje L_{PA} jako rozhodující parametr pro posouzení, zda uvažovaný elektrický stroj vyhovuje normalizačním doporučením limitních hodnot, může být stanovena kteroukoliv z obou uvedených metod, neboť jejich výsledky jsou adekvátní.

Z výsledků měření uvedených v tab. 2 je však zřejmý větší rozdíl mezi naměřenými hladinami zvuku L_A v jednotlivých měřicích místech metodou podle ISO 1680/1 než při použití metody podle ČSN 01 1604. Souvisí to zcela evidentně s umístěním měřicích bodů, které je u obou metod rozdílné. Při měření je však nutné respektovat podmínky, které jsou shrnuty v závěru druhé kapitoly a které vyplývají z teoretických úvah o vyjádření akustického výkonu měřeného stroje.

Literatura

- [1] ČSN 01 1604. Hluk. Stanovení hladiny akustického výkonu hluku strojů ve volném zvukovém poli nad zvuk odrážející rovinou. Technická metoda, 1980.
- [2] ISO 1680/1 Acoustic-Test code for the measurement of airborne noise emitted by rotating electrical machinery. Part 1. Engineering method, 1986.
- [3] ČSN 35 0019, část 01. Elektrické stroje točivé. Zkouška měření hluku, 1979.

534.6:621.313