
Методика расчета вибрации и шума вентиляно-индукторных двигателей

Нгуен Куанг Кхоа, кафедра «Электроснабжение и Электропривод», ЮРГПУ(НПИ) Южно-Российский государственный политехнический университет (Новочеркасский политехнический институт) им. М. И. Платова. E-mail: nguyenkk@mail.ru

в данной работе рассматривается методика расчета вибрации и шума вентиляно-индукторных двигателей (ВИД). Расчет вибрации производится следующим образом: проведение расчета механического сопротивления; определение сил, действующих на статор, которые разлагаются в гармонический ряд, и каждая из гармоник приводится к среднему сечению ярма; расчет амплитуды вибрации от каждой из гармоник; построение трехоктавной осциллограммы вибрации; расчет уровня шума; построение трехоктавной осциллограммы шума.

Ключевые слова: вибрация электромашины, уровень вибрации ВИД, шум электромашины, уровень шума, вибрация и шум.

После определения вентиляно-индукторной машины, как электромеханического преобразователя энергии, рассмотрения её теплового состояния необходимо оценить, как она будет действовать на окружающее ее пространство. В первую очередь представляет интерес, как воздействует ее работа на людей и здание, в котором она находится, т.е. уровень вибрации и шума, создаваемой ей. Это, прежде всего, относится к электрическим машинам средней и большой мощности. Уровень вибрации и шума машин обычно не превышает 80-90 дБ. в данной работе рассматривается методика расчета вибрации и шума ВИД.

Расчет производится обычно только для статора. Существуют различные методы расчета вибрации и шума. Наиболее точными считаются способы определения вибрации и шума на основе конечно-элементных моделей. Однако, это требует существенных финансовых затрат (приобретение программы, наличие высокопроизводительной вычислительной техники, квалифицированных специалистов для ввода данных и обработки результатов), а результаты вычислений сопоставимы с результатами, проведенными аналитическими методами. Это связано с тем, что шум и вибрация оцениваются по логарифмической шкале, а ошибка при расчете вибрации даже в два раза по логарифмической шкале приведет к ошибке всего на 6 Дб ($D = 20\log 2 = 6$). Поэтому использование упрощенных методов дает хорошие результаты.

В этом случае считается, что статор представляет кольцо, шириной ярма, к которому прикреплены зубцы и обмотка в виде груза. К кольцу прикладываются равномерно распределенные сконцентрированные силы. В соответствии с имеющимся порядком деформации определяются резонансные частоты, вибрация и шум от каждой из гармоник.

Дальше приведен расчет индукторного двигателя, основанный на одном из аналитических способов расчета вибрации и шума электрических машин.

Результатом расчета является определение резонансных частот (на них двигатель обычно и шумит) и построение вибро-шумовых осциллограмм.

Для определения частоты собственных колебаний можно использовать формулу:

$$\omega_0 = \begin{cases} \frac{r(r^2 - 1)}{\sqrt{r^2 + 1}} \sqrt{\frac{Eh^3}{12mR_c^4}} & \text{при } rh/R_c \leq 1,0, \\ \frac{r(r^2 - 1)}{\sqrt{r^2 + 1}} \sqrt{\frac{Eh^3}{12mR_c^4(1 + 3r^2\chi)}} & \text{при } rh/R_c > 1,0, \text{ где } \chi = h^2/(12R_c^2) \end{cases}$$

В формуле r – порядок деформации, m – масса, приходящаяся на 1 м^2 средней цилиндрической поверхности ярма, кг (зубцовая зона с обмоткой считаются присоединенной массой); h – высота ярма статора, м; R_c – средний радиус ярма, м; E – модуль упругости, равный для несегментированных ярем – $2,1 \times 10^{11} \text{ Н/м}^2$, а для пакетов, набранных из сегментов, – $1,2 \times 10^{11} \text{ Н/м}^2$.

Расчет вибрации производится следующим образом:

- Производится расчет механического сопротивления;
- Определяются силы, действующие на статор, которые разлагаются в гармонический ряд, и каждая из гармоник приводится к среднему сечению ярма;
- Рассчитываются амплитуды вибрации от каждой из гармоник.
- Строится трехоктавная осциллограмма вибрации.
- Рассчитывается уровень шума.
- Строится трехоктавная осциллограмма шума.

Полное механическое сопротивление определяется по формуле:

$$Z_c = \omega m_c - 1/(\omega \lambda_c)$$

где угловая частота колебаний $\omega = 2\pi f$, (f – частота колебаний); колеблющаяся масса $m_c = M_c / (2\pi R_c l_t)$, (M_c – полная масса пакета железа статора с обмоткой; R_c – средний радиус ярма; l_t – активная длина ярма);

приведенная податливость статора:

$$\lambda_c = \begin{cases} \frac{12R_c}{E} \left(\frac{R_c}{h}\right)^3 \frac{r^2 + 1}{r^2(r^2 - 1)^2} & \text{при } rh/R_c \leq 1,0, \\ \frac{12R_c}{E} \left(\frac{R_c}{h}\right)^3 \frac{r^2 + 1}{r^2(r^2 - 1)^2} (1 + 3r^2\chi) & \text{при } rh/R_c > 1,0, \text{ где } \chi = h^2/(12R_c^2) \end{cases}$$

Аналогично рассчитывается механическое сопротивление корпуса (если он достаточно простой формы).

Производится расчет изменения радиальной силы индукторного двигателя в зависимости от углового положения ротора. Также, как и расчет момента, расчет сил может строиться на основе распространенного энергетического подхода. Значение силы для углового положения α одной

фазы определяется по формуле Вудсона – как частную производную энергии контуров по перемещению в радиальном направлении при условии постоянства потоков $\Phi_k = \text{const}$:

$$F_{yk} = -\frac{dW_k}{d\delta} \mid \Phi_k = \text{const}, k = 1, m, \quad (4)$$

где F_{yk} – значение радиальной силы, создаваемой полюсами с катушками k -й фазы; W_k – магнитная энергия катушек k -й фазы, обусловленная магнитным полем воздушного зазора Φ_k ; d – воздушный зазор; m – число фаз.

Практически сила определяется применением разностной схемы :

$$F_{yk} \approx -\frac{1}{10\Delta\delta} (-2W_{k(-2)} - W_{k(-1)} + W_{k(+1)} + 2W_{k(+2)}), \quad (5)$$

где $\Delta\delta$ – шаг дифференцирования;

$W_{k(-2)} \dots W_{k(+2)}$ магнитная энергия k -й фазы, при расстоянии зубцов статора от зубцов ротора на $-2\Delta\delta \dots +2\Delta\delta$ соответственно.

Магнитная энергия для углового положения α и с различными значениями воздушного зазора определяется тем же способом, что и для расчета вращающего момента индукторного двигателя.

При этом для каждого значения воздушного зазора $W_{k(-2)} \dots W_{k(+2)}$ применяется свой набор переходных характеристик.

Расчетная осциллограмма полученная таким образом, имеет вид представленный на рис.1. Так как полюс тяжения представлен m – катушек, расположенных рядом, необходимо рассчитать силу, действующую на этот сектор.

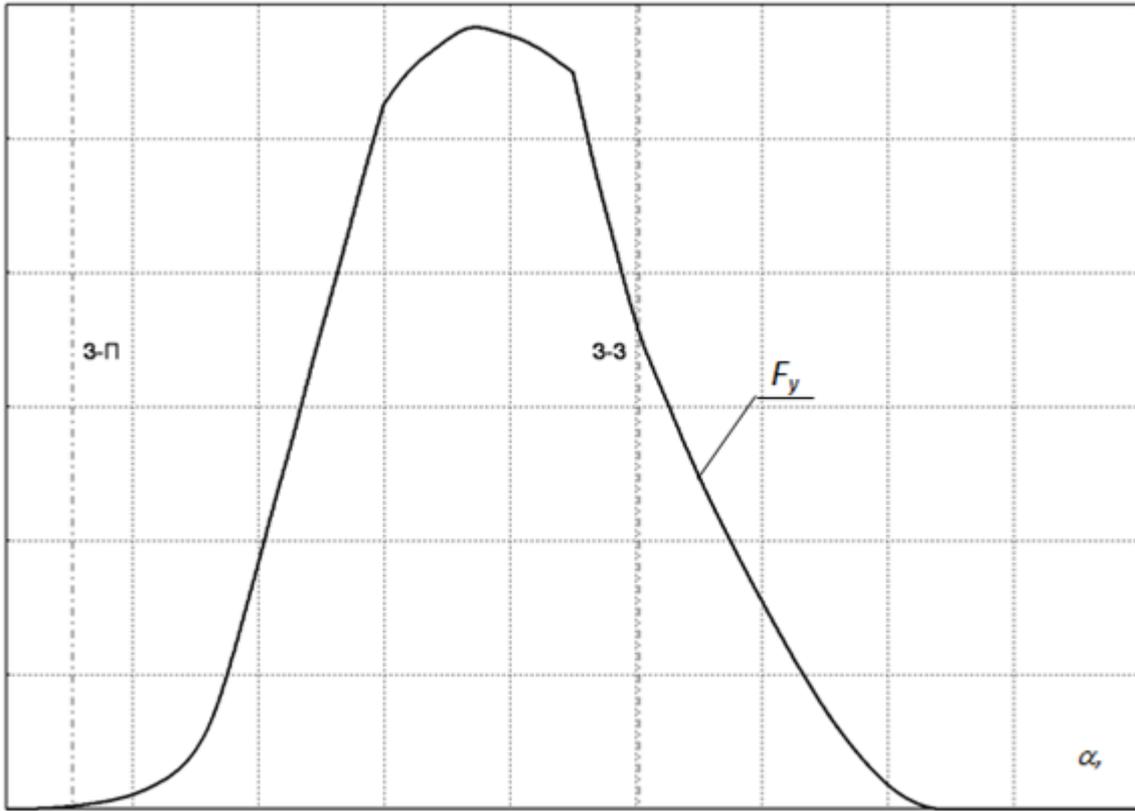


Рис. 1. Осциллограмма изменения радиальной силы одного зубца

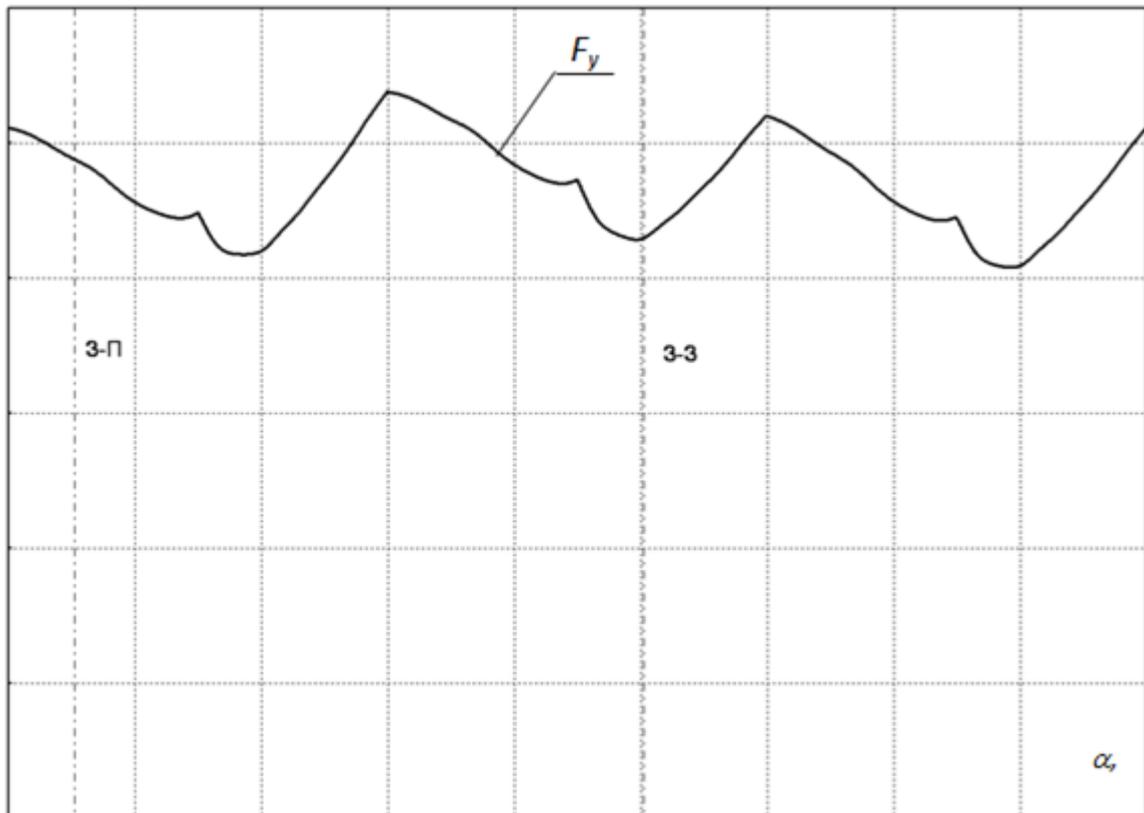


Рис. 2. Осциллограмма изменения радиальной силы на полюс

Сила тяжения для секторе рассчитывается векторным суммированием сил от каждой фазы представленных в данном полюсе. Например, для трехфазного двигателя с комбинацией зубцов

24/16, имеющего порядок деформации 8 и соответственно 8 полюсов тяжения сила, действующая на сектор рассчитывается как векторная сумма сил трех соседних зубцов на рис.2.. Чтобы получить осциллограммы вибрации и шума необходимо найти виброперемещение от каждой гармоники. При разложении в ряд Фурье частота первой гармоники равна частоте питания, а остальные являются произведением ее номера на эту частоту.

Для этого необходимо рассчитать силу, действующую на единицу поверхности:

$$p_{01}^i = F_m^i / S_{сек}, \quad (6)$$

где F_m^i – амплитуда i -й гармоники; $S_{сек} = \pi D l_d / N_p \times m$ – площадь сектора (D – диаметр расточки, l_d – длина пакета по воздушному зазору; N_p – число больших зубцов; m – число фаз).

Произвести приведение удельной силы к среднему радиусу ярма:

$$p_0^i = p_{01}^i \cdot R_0 / R_c, \quad (7)$$

где R_0 – радиус расточки статора; R_c – средний радиус;

Определить по следующей формуле виброперемещение:

$$\dot{y} = p_0 / z_c$$

Для построения виброосциллограммы необходимо рассчитать, таким образом, амплитуды вибрации от каждой гармоники, вычислить действующее значение (для синусоиды разделить на $\sqrt{2}$) и построить график зависимости уровня вибрации от частоты рис.3.

Часто для анализа вибрации и шума удобнее рассматривать среднегеометрические частоты, т.е. для ряда частот представленные в таблице 1. Расчет осуществляется следующим образом. Все частоты в диапазоне от f_{min} до f_{max} (в таблице 7,1 вторая и третья строки) складываются геометрически (то есть извлекается корень квадратный из суммы квадратов значений действующих вибрации или шума гармоник).

Таблица. 1. 1/3 - октавные частоты

$f, \Gamma\text{ц}$	5	6.3	8	10	12.5	16	20	25	31.5	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000
$f_{min}, \Gamma\text{ц}$	4.47	5.62	7.08	8.91	11.22	14.13	17.78	22.39	28.18	35.48	44.67	56.23	70.79	89.13	112.2	141.3	177.8	224	282	355	447	562	708	891	1122	1413	1778	2240	2820	3550	4470	5620	7080	8910
f_{max}, Γ	5.62	7.08	8.91	11.22	14.13	17.78	22.39	28.18	35.48	44.67	56.23	70.79	89.13	112.2	141.3	177.8	224	282	355	447	562	708	891	1122	1413	1778	2240	2820	3550	4470	5620	7080	8910	11220

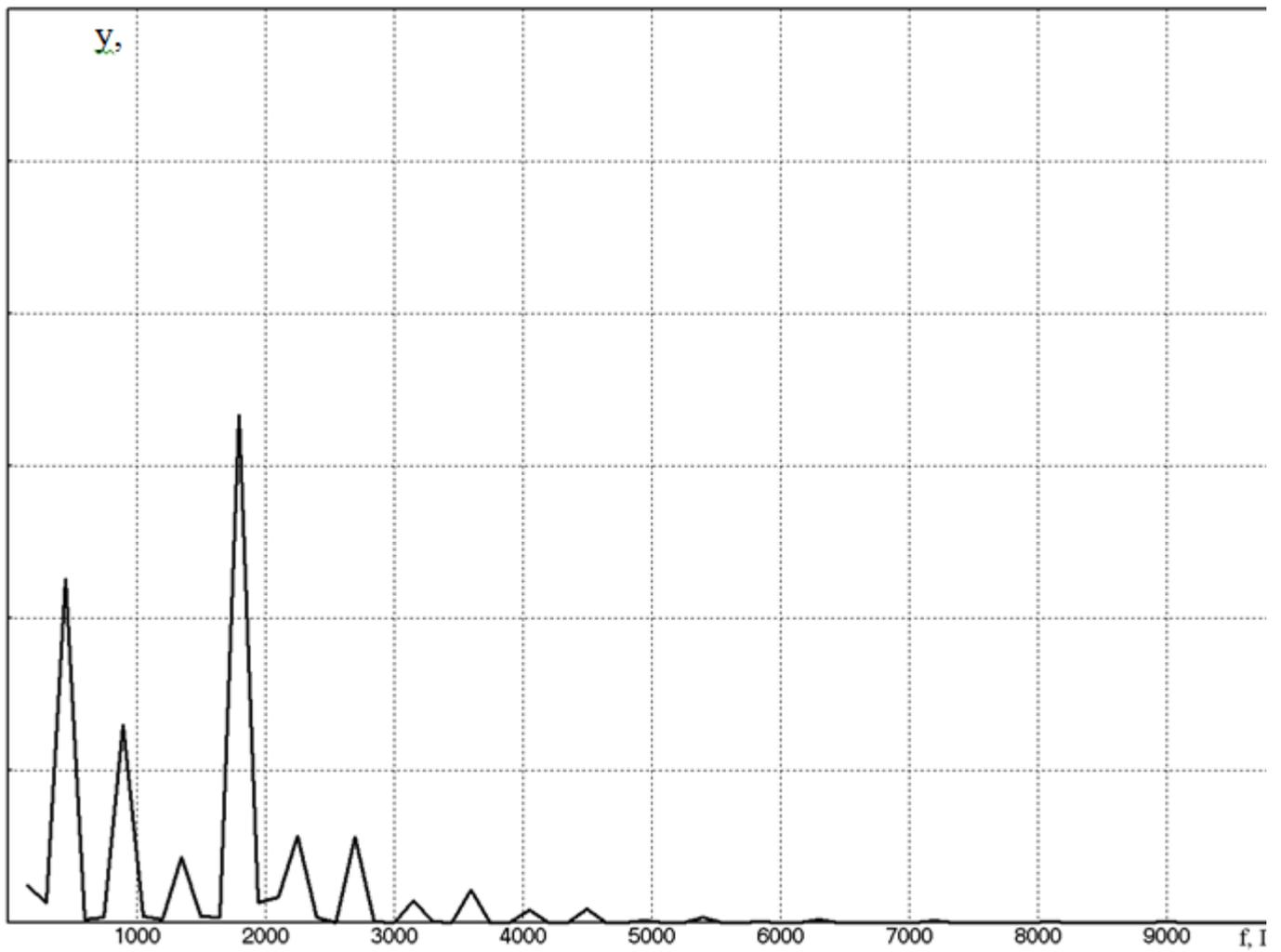


Рис. 3. Осциллограмма вибрации индукторного двигателя

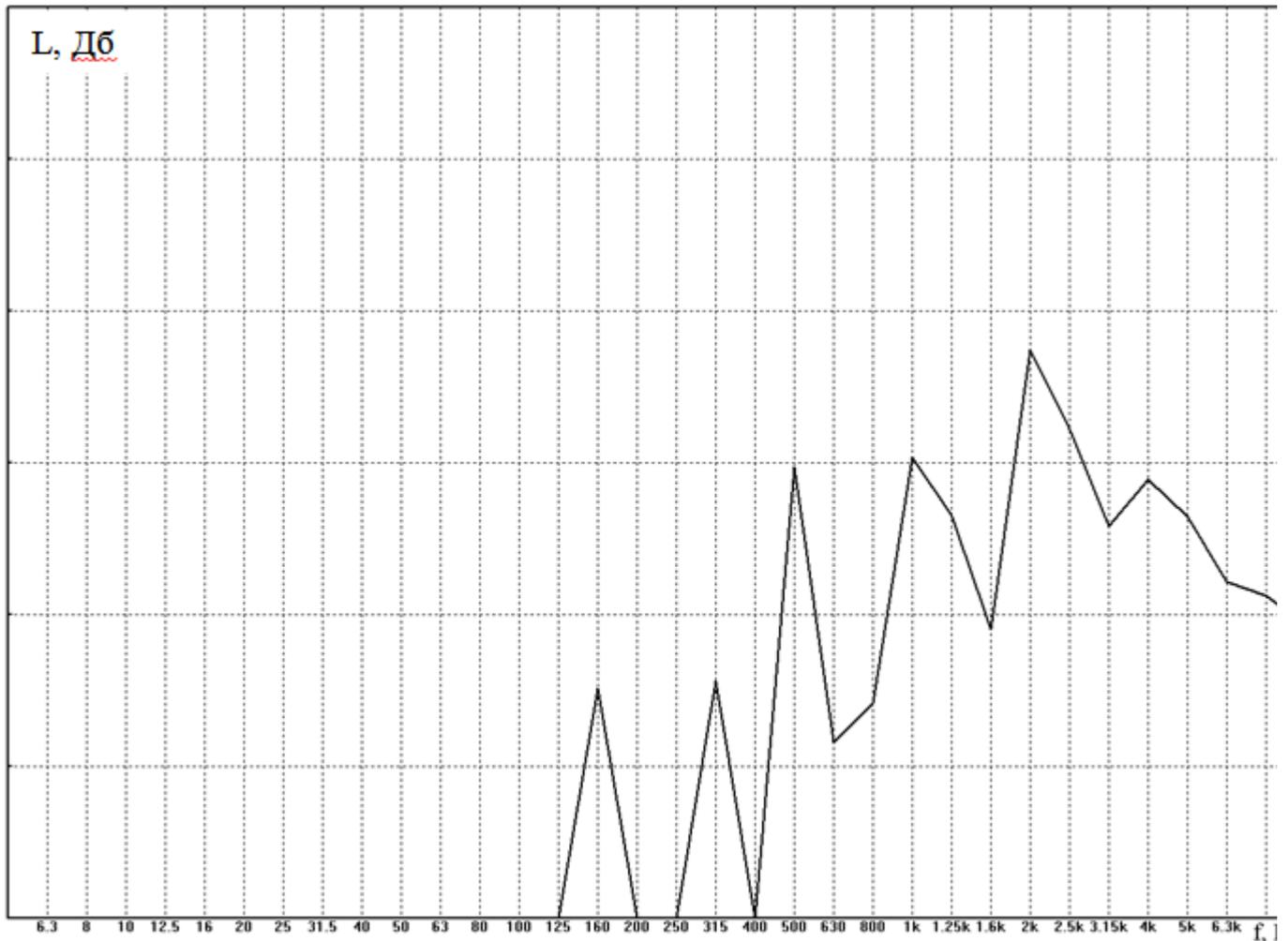


Рис. 4. 1/3 - октавный спектр вибрации индукторного двигателя

После этого строится график зависимости третьоктавной частоты (в таблице первая строка) и соответствующего ей значения вибрации в децибелах рис.4., вычисляемых по формуле:

$$L = 20 \lg\left(\frac{\omega \dot{y}}{3 \cdot 10^{-4}}\right), \quad (9)$$

где $3 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}^2$ - пороговый уровень вибрации; $\omega = 2\pi f$ - угловая частота колебаний (f - частота колебаний)

Кроме вычисления значения вибрации также необходимо определить уровень шума. Для этого необходимо определить величину колебательного давления:

$$p = \rho c \dot{y}, \quad (10)$$

где ρc - удельное акустическое сопротивление (для воздуха $420 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$);

Вычислить максимальную силу звука у поверхности сферического излучателя n -порядка:

$$I_r = I_0 N_{отн}, \quad (11)$$

где $I_0 = \frac{1}{2} p \dot{y}$ - сила звука; $N_{отн}$ - относительная мощность излучения определяется по

рис.5 по отношению $\pi D/l$ (D – диаметр корпуса, $l=c/f$ – длина волны (f – частота колебаний)).

Аналогично вибрации строят осциллограммы шума рис.6 и рис.7.. При этом уровень шума в децибелах вычисляется по формуле:

$$L = 20 \lg\left(\frac{I_r}{10^{-12}}\right), \quad (12)$$

где 10^{-12} Вт/м² - пороговая сила звука;

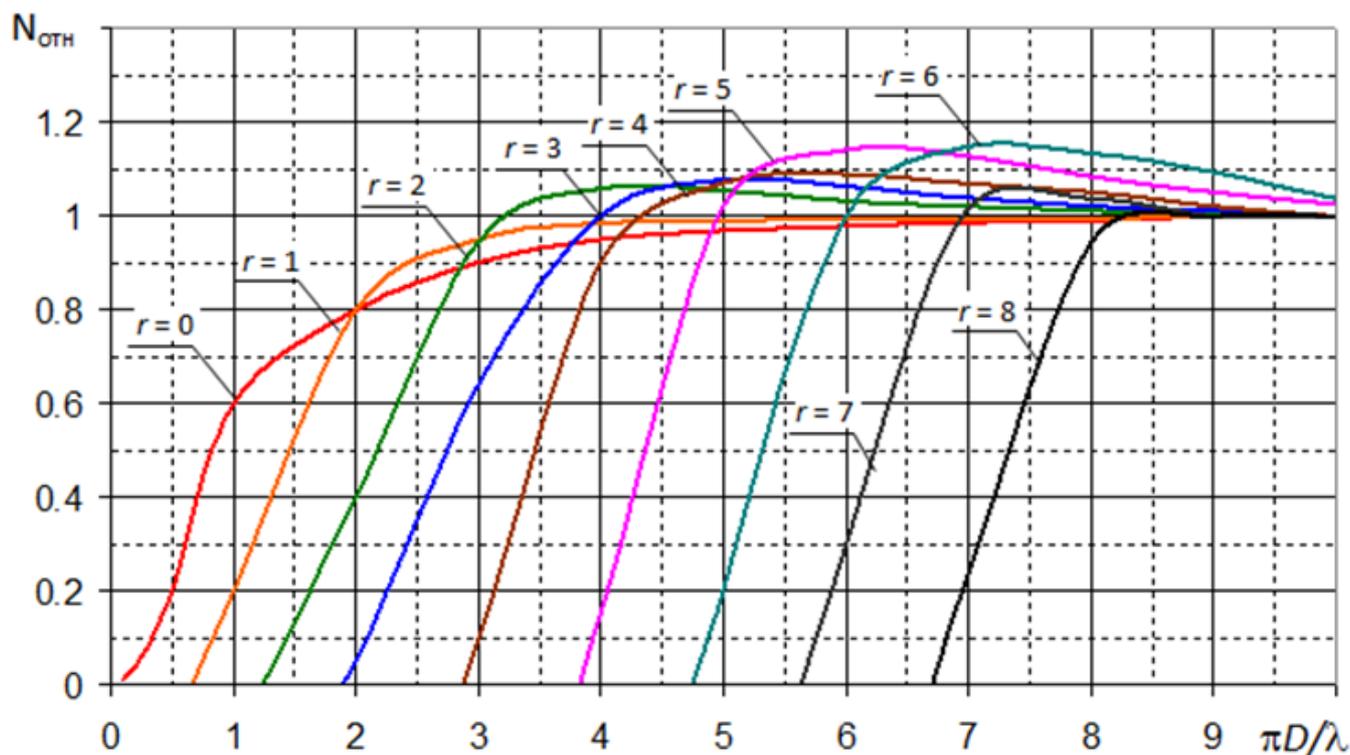


Рис.5. Суммирование уровней громкости

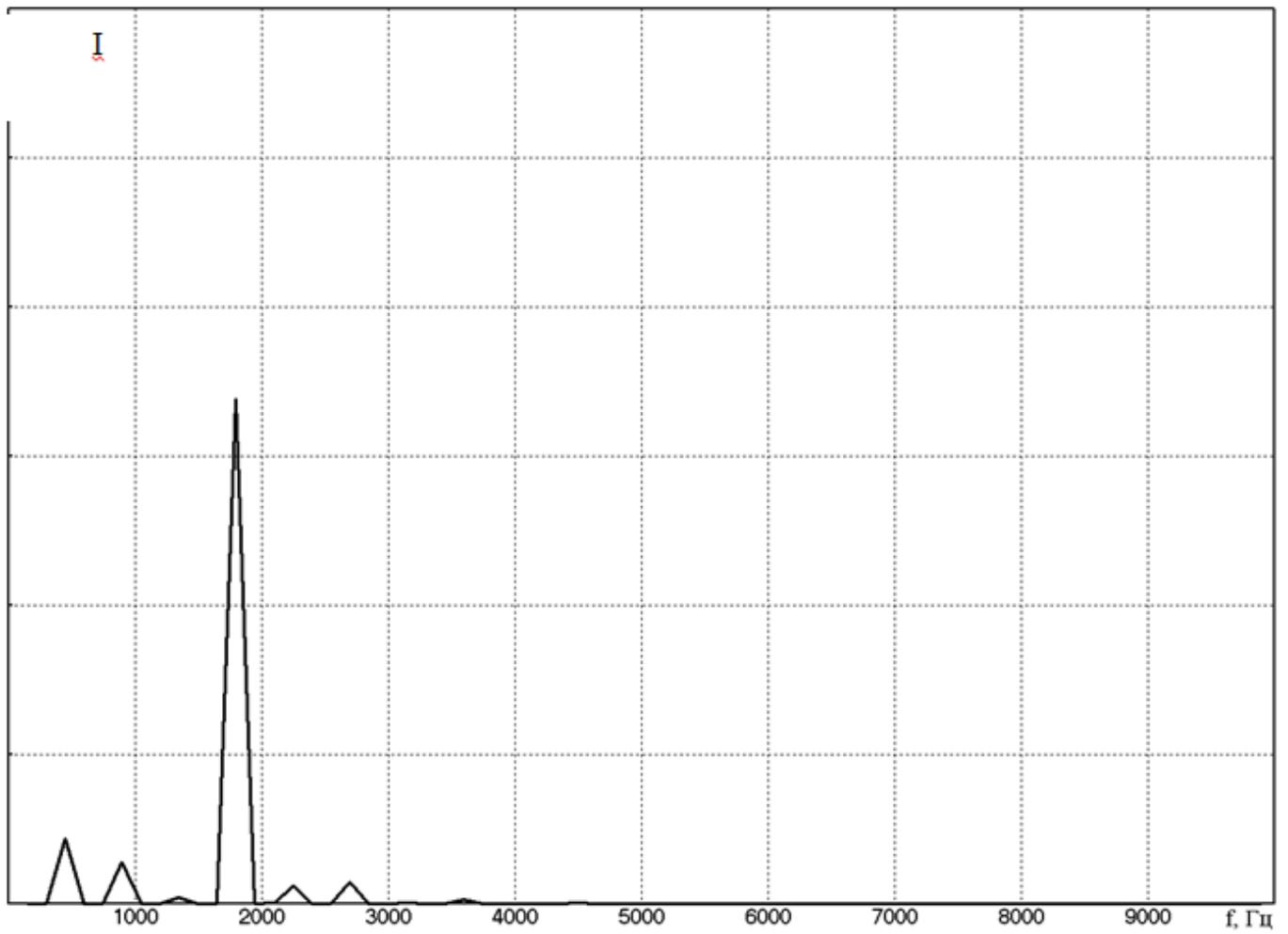


Рис. 6. Осциллограмма шума индукторного двигателя

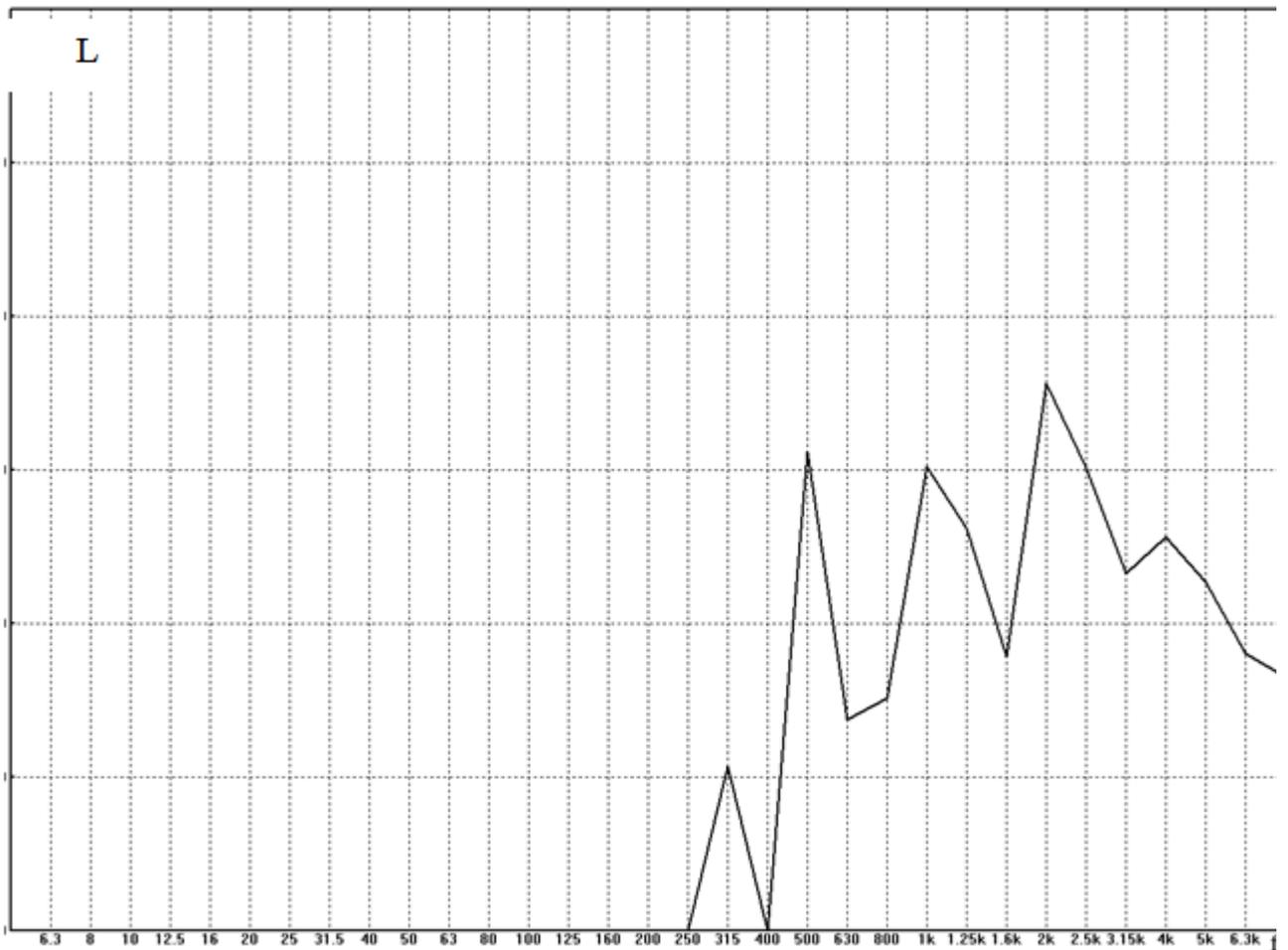


Рис. 7. 1/3 - октавный спектр шума индукторного двигателя

Таким образом, определяющее влияние на вибрацию и шум индукторного двигателя оказывает порядок деформации и ширина его яра статора. Понятно, что в конечном счете необходимо исследовать всю конструкцию в целом на наличие резонансов. Однако, чем больше порядок деформации и больше ширина яра, тем выше частота собственных колебаний. А известно, что наибольшую трудность представляют вибрация и шум на низких частотах. Также важно сравнивать собственную частоту статора с номинальной частотой питания и кратными ей.

Литература

1. Костюков В.Н., Науменко А.П. Практические основы виброакустической диагностики машинного оборудования: Учеб. Пособие / Под ред. В.Н. Костюкова. - Омск: Из-во ОмГТУ, 2002. - 108 с.
2. Шубов И. Г. Шум и вибрация электрических машин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-е, 1986. – 208 с.: ил.
3. Вибрации в технике: справочник в 6 т./ под ред. В.Н. Челомея. – М.: Машиностроение, 1978.