

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРОМОЩНОСТИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Браташ О.В., асп., Калинов А.П., к.т.н., доц.

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского

ул. Первомайская, 20, 39600, г. Кременчуг, Украина

E-mail: [scenter@kdu.edu.ua](mailto:scenter@kdu.edu.ua)

На основании проведенного анализа существующих методов определения вибромощности электрической машины предложен метод аналитического расчета на основе алгоритма дискретной свертки двух рядов, представленных в виде векторов виброскорости и виброускорения. Показано, что вибромощность асинхронного двигателя может составлять значительную часть потребляемой активной мощности, что необходимо учитывать при проведении технической диагностики.

**Ключевые слова:** вибромощность, вибрация, вибродиагностика.

**Введение.** Преобразование энергии в электрических машинах и технологических механизмах неизбежно связано с появлением переменных сил и моментов, порождающих вибрацию. При наличии повреждений в электрической машине уровень вибрации повышается. Потери, вызванные повышением мощности вибрации, влияют на суммарные потери потребляемой мощности, поскольку входят в общий энергобаланс работающего двигателя.

Широко используемые для анализа вибраций спектральные и фазовые характеристики вибро смещения, виброскорости и виброускорения, применяемые по отдельности, не дают представления о распределении потоков энергии в исследуемом объекте. Исследование колебательной мощности (вибромощности) электромеханической системы позволит анализировать распределение этих потоков в пространстве во временной и частотной области [1].

**Анализ предыдущих исследований.** Параметр вибромощности следует рассматривать как основной при оценке виброактивности машины в конкретных условиях ее работы. Величина вибромощности концентрирует в себе информацию, которую дают уровни вибрации машины и силы воздействия машины на опорные и неопорные связи. Определенный круг задач по созданию малошумных машин и агрегатов затруднительно решить без информации об излучаемой машиной вибромощности.

Результаты измерений излучаемой вибромощности могут быть использованы в целях:

- определения и сравнения виброактивности машин различных конструкций, масс и габаритных размеров в конкретных условиях эксплуатации;
- разработки технических требований к допустимой вибрации машин;
- разработки предложений по контролю вибрации машин и условий проведения этого контроля;
- решения задач виброакустической диагностики машин и их виброакустической защиты;
- разработки мероприятий по уменьшению виброактивности машин и повышению эффективности виброакустической защиты машин [2, 3].

Существующие подходы к измерениям и расчету вибромощности описаны в литературных источниках [2-4]. Мгновенная вибромощность получается на основе сигналов скорости и ускорения, измерен-

ных в необходимом направлении. В общем виде мгновенная вибромощность рассчитывается следующим образом:

$$P_V(t) = V_V(t)F(t), \quad (1)$$

где  $V_V(t)$  - мгновенное значение виброскорости вдоль одной из трех осей, м/с;  $F(t)$  - мгновенное значение силы, направленной по одной из осей, Н.

В работах [2, 3] описана методика косвенных измерений вибромощности. Мощность определяется по результатам анализа взаимных спектров вибрации на входе и выходе виброизоляторов и на основе информации о механических сопротивлениях виброизоляторов машины как среднее в бесконечном промежутке времени скалярного произведения векторов силы, действующей на  $n$ -й виброизолятор, и скорости вибрации на входе  $n$ -го виброизолятора в месте соединения с машиной:

$$P_V^n(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} \int_{t_1}^{t_2} F^n(t)V_V(t)dt, \quad (2)$$

где  $\Delta t = t_2 - t_1$  – интервал времени, в течение которого выполняется усреднение,  $n$  – номер виброизолятора.

В работе [4] расчет вибромощности проводится на основе следующего выражения:

$$P_V(t) = V_V(t)a_V(t)m_{np}, \quad (3)$$

где  $a_V(t)$  – мгновенное значение виброускорения вдоль одной из трех осей, м/с<sup>2</sup>;  $m_{np}$  – приведенная масса, кг.

Достоинство метода определения вибромощности по выражению (3) состоит в том, что нет необходимости в датчике силы, достаточно использовать только вибродатчик. Предполагается, что напрямую измеряется только один из параметров: виброскорость или виброускорение. Второй параметр рассчитывается косвенным путем на основе интегрирования или дифференцирования исходного сигнала по времени:

$$V_V(t) = \int a_V(t)dt; \quad (4)$$

$$a_V(t) = \frac{dV_V(t)}{dt}. \quad (5)$$

Для преобразования виброускорения в вибро-скорость необходимо интегрирование, требующее усложнения аппаратуры и ведущее к дополнительным погрешностям. Кроме того, точность замеров низкочастотных составляющих вибросигналов может снизиться из-за того, что эти замеры осуществляются вблизи нижней границы разрешающей способности приборов, что неизбежно приводит к искажению результатов [2].

На основании проведенного анализа можно сделать вывод о необходимости разработки нового метода измерения и расчета вибромощности электрических машин, который будет учитывать недостатки существующих методов.

**Цель работы.** Разработка математического аппарата расчета гармонических составляющих мгновенной вибромощности на основе гармонических составляющих виброускорения и вибро-скорости и её количественный анализ.

**Материал и результаты исследований.** Как упоминалось выше, наиболее рациональным способом определения вибромощности является способ, при котором только один из вибропараметров измеряется напрямую. Поскольку наиболее часто используемыми приборами для измерения вибраций являются акселерометры, то в качестве исходного прямо измеряемого сигнала можно принять сигнал виброускорения.

При расчете мгновенной виброскорости погрешностей можно избежать, если вместо мгновенных значений использовать гармонический состав сигнала виброускорения. В связи с этим опе-

рация интегрирования заменяется расчетом гармоник виброскорости  $V_{Vk}$  по гармоникам виброускорения  $A_{Vk}$ :

$$V_{Vk} = \frac{A_{Vk}}{(k/T) \cdot 2\pi}, \text{ мм/с}, \quad (6)$$

где  $T$  - временной интервал, на котором анализируется сигнал, с;  $k$  - номер гармоники при разложении сигнала виброускорения в ряд Фурье.

Исходя из второго закона Ньютона, выражение для расчета полной вибромощности имеет вид:

$$P_{Vk} = [m_{np} A_{Vk} + m_{np} g] V_{Vk}, \quad (7)$$

где  $m_{np}$  - приведенная масса, кг;  $g$  - ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Кроме динамической составляющей вибромощности, передаваемой в опоры, методика определения которой описана в работах [2-4], существует составляющая  $P_{Vsk} = m_{np} g V_{Vk}$ , обусловленная воздействием веса машины на опоры, которую необходимо учитывать. Для расчета мгновенной вибромощности на базе ортогональных гармонических составляющих виброскорости и виброускорения используем алгоритм [5, 6], в основе которого лежит теорема про свертку дискретных рядов. Алгоритм реализован в пакете MathCad с помощью подсистемы символьных вычислений:

$$P_a := \left. \begin{array}{l} \text{for } m \in 0, 1..M \\ P_m \leftarrow 0 \\ \text{for } k \in 0..N \\ P_m \leftarrow P_m + (ReI_k \cdot Re \cdot U_{m-k} - ImI_k \cdot Im \cdot U_{m-k}) \text{ if } m-k \geq 0 \\ P_m \leftarrow P_m + ReI_{|m-k|} \cdot ReU_k + ReI_k \cdot ReU_{k-m} + ImI_k \cdot ImU_{k-m} + ImI_{|m-k|} \cdot ImU_k \text{ otherwise} \\ P_m \leftarrow \frac{P_m}{4} \text{ if } m=0 \\ P_m \leftarrow \frac{P_m}{2} \text{ if } m>0 \end{array} \right\} P$$

$$P_b := \left. \begin{array}{l} \text{for } m \in 0, 1..M \\ P_m \leftarrow 0 \\ \text{for } k \in 0..N \\ P_m \leftarrow P_m + ImV_k \cdot ReA_{m-k} + ReV_k \cdot ImA_{m-k} \text{ if } m-k \geq 0 \\ P_m \leftarrow P_m + ImV_k \cdot ReA_{k-m} + ImV_{|m-k|} \times ReA_k + ReV_{|m-k|} \cdot ImA_k + ReV_k \cdot ImA_{k-m} \text{ otherwise} \\ P_m \leftarrow \frac{P_m}{2} \text{ if } m=0 \\ P_m \leftarrow \frac{P_m}{2} \text{ if } m>0 \end{array} \right\} P$$

где  $Pa$  – косинусная составляющая мгновенной вибромощности;  $Pb$  – синусная составляющая мгновенной вибромощности;  $ReA_k, ReV_k$  – косинусные составляющие виброускорения и виброскорости;  $ImA_k, ImV_k$  – синусные составляющие виброускорения и виброскорости;

$N, M$  – количество гармоник виброускорения и виброскорости соответственно;  $m, n$  – номера гармоник виброускорения и виброскорости.

Для численного анализа вибромощности электрической машины по предлагаемому способу были проведены экспериментальные исследования сигналов вибрации для двигателей типа MF-11-16 с параметрами  $P_n = 1,4$  кВт;  $I_n = 9,3$  А;  $n_n = 886$  об/мин,  $m = 70$  кг [7].

В табл. 1 приведены наиболее характерные опыты при работе АД от симметричного ( $K_{\text{несим(U)}} = 1,1\%$ ) и несимметричного ( $K_{\text{несим(U)}} = 20,8\%$ ) источников питания. Анализ проводится по трем пространственным осям (X, Y, Z). Оценка вибромощности проводится по параметру среднеквадратического значения (СКЗ) для четырех частотных диапазонов: 12,5-87,5 Гц – низкочастотная вибрация, 87,5-400 Гц и 400-1000 Гц – вибрация в средней полосе частот, 1000-3000 Гц – высокочастотная вибрация, а также СКЗ было рассчитано для всего диапазона частот (табл. 1). Такое разделение необходимо, поскольку причины, которые вызывают рост вибрации в этих диапазонах, имеют различную природу.

**Таблица 1 – Результаты экспериментов**

Симметричный режим													
Ось	$V_v, \text{ мм/с}$				$A_v, \text{ мм/с}^2$				Вибромощность $P_v, \text{ Вт}$				
	12,5-87,5 Гц	87,5-400 Гц	400-1000 Гц	12,5-1000 Гц	12,5-87,5 Гц	87,5-400 Гц	400-1000 Гц	12,5-1000 Гц	12,5-87,5 Гц	87,5-400 Гц	400-1000 Гц	1000-3000 Гц	12,5-3000 Гц
X	46,73	1,993	1,666	46,79	4,995	2,69	7,121	9,73	11,06	5,861	17,77	15,74	26,84
Y	53,47	2,672	1,402	53,55	6,217	4,086	5,757	9,407	11,94	11,09	15,62	7,408	23,74
Z	32,81	2,738	3,174	33,08	5,131	2,561	13,61	14,77	7,092	4,689	24,02	5,796	26,12
Потребляемая трехфазная мощность $P, \text{ Вт}$													
$P_{31,25}$		$P_{50}$		$P_{100}$		$P_{200}$		$P_{300}$		$P_0$		$P_{\text{эф}}$	
18,64		27,95		143,55		13,57		150,94		935,56		244,47	
Несимметричный режим													
Ось	$V_v, \text{ мм/с}$				$A_v, \text{ мм/с}^2$				Вибромощность $P_v, \text{ Вт}$				
	12,5-87,5 Гц	87,5-400 Гц	400-1000 Гц	12,5-1000 Гц	12,5-87,5 Гц	87,5-400 Гц	400-1000 Гц	12,5-1000 Гц	12,5-87,5 Гц	87,5-400 Гц	400-1000 Гц	1000-3000 Гц	12,5-3000 Гц
X	13,28	6,765	5,602	15,89	2,814	9,489	23,44	25,36	2,653	6,216	18,12	8,33	21,04
Y	14,27	6,663	5,972	16,77	2,487	13,43	22,86	26,33	3,302	11,80	20,33	15,81	28,47
Z	16,36	28,49	5,179	33,11	3,459	26,89	18,07	31,66	8,419	37,73	41,33	13,37	58,03
Потребляемая трехфазная мощность $P, \text{ Вт}$													
$P_{15,625}$		$P_{50}$		$P_{100}$		$P_{200}$		$P_{300}$		$P_0$		$P_{\text{эф}}$	
26,105		48,48		$2,04 \cdot 10^3$		389,59		195,56		$3,21 \cdot 10^3$		$2,14 \cdot 10^3$	

Даже при питании от симметричного источника питания режим работы АД характеризуется существенной несимметрией токов статора, характеризующейся наличием составляющей нулевой последовательности  $I_0=47\%$ , что объясняется параметрической несимметрией фаз статора.

Исследования электромагнитных и механических вибраций для указанных режимов показали, что несимметрия питания проявляется в возрастании уровня виброускорения, виброскорости, потребляемой и колебательной мощностей, особенно это характерно для осевого направления (ось Z) (рис.1-8).

При исследованиях формирования спектра вибромощности по спектрам виброскорости и виброускорения расчеты проводились по полным спектрам и по выборочным, наиболее весомым, составляющим спектров. Далее на основе вышеприведенного алгоритма была рассчитана вибромощность. При сравнении спектров исходной и пересчитанной вибромощности оказалось, что в пер-

вом случае СКЗ = 58,03 Вт, а во втором – СКЗ = 34,325 Вт. Приведенный результат показывает существенное влияние на СКЗ вибромощности промежуточных, даже не очень весомых, гармоник виброускорения и виброскорости (рис. 9-11).

Анализ экспериментальных данных определения вибромощности показал, что для симметричного режима работы АД суммарное по трем осям эффективное значение вибромощности составляет 76,71 Вт, т.е. 8,2% от средней трехфазной потребляемой электрической мощности. Для несимметричного режима суммарное эффективное значение вибромощности составляет 107,5 Вт, т.е. 3,9 % от среднего значения потребляемой электрической мощности. По отношению к номинальной мощности исследуемого АД, значения суммарного эффективного значения вибромощности составляют 5,5% и 7,7% соответственно для симметричного и несимметричного режимов.

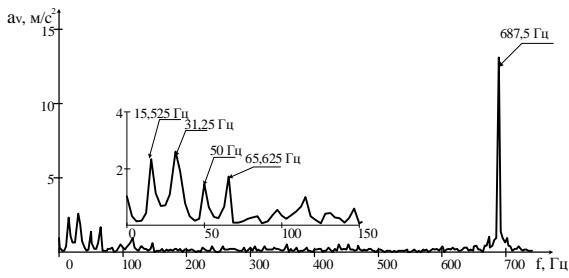


Рисунок 1 – Спектр віброускорення по осі Z при симетрії фаз

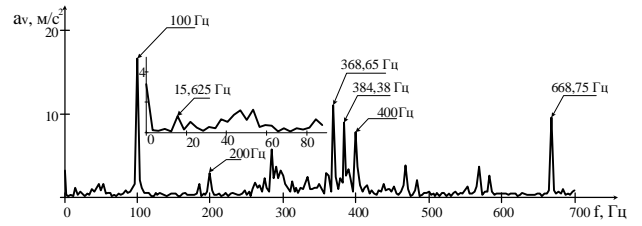


Рисунок 2 – Спектр віброускорення по осі Z при несиметрії фаз

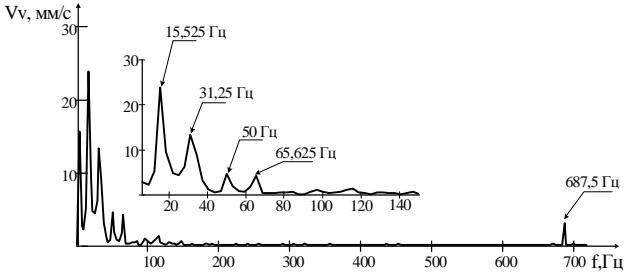


Рисунок 3 – Спектр віброскорості по осі Z при симетрії фаз

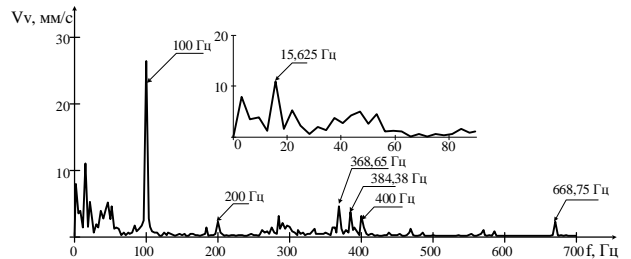


Рисунок 4 – Спектр віброскорості по осі Z при несиметрії фаз

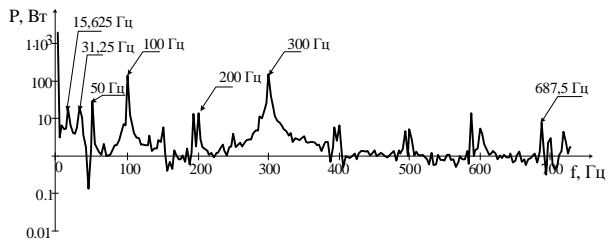


Рисунок 5 – Спектр споживаної електричної потужності при симетрії фаз

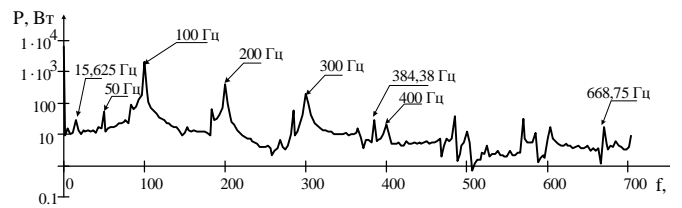


Рисунок 6 – Спектр споживаної електричної потужності при несиметрії фаз

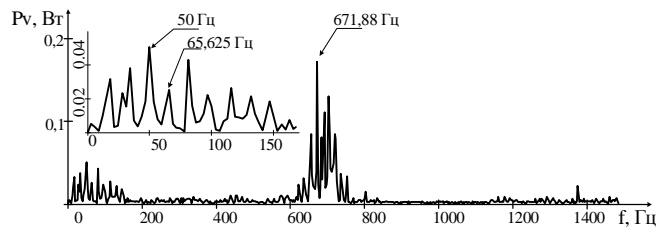


Рисунок 7 – Спектр вібропотужності по осі Z при симетрії фаз

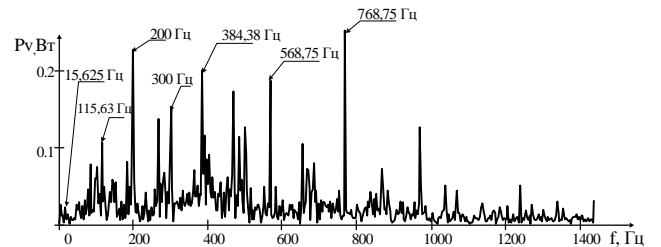


Рисунок 8 – Спектр вібропотужності по осі Z при несиметрії фаз

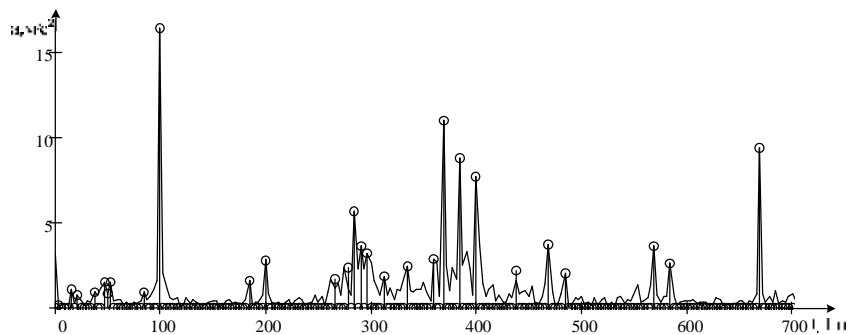


Рисунок 9 – Спектр віброускорення по осі Z при несиметрії фаз  
(—) – вихідний сигнал, (○) – основні частоти

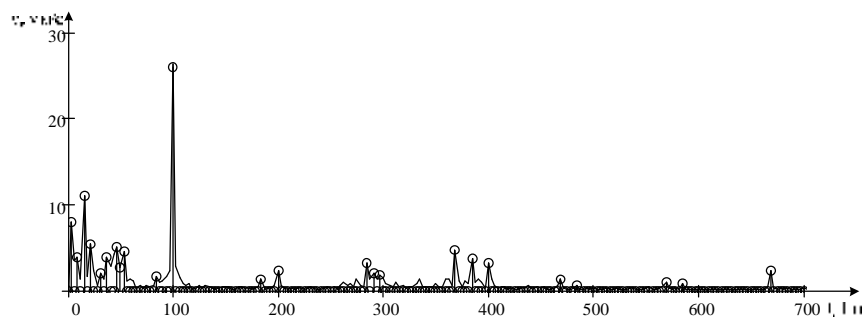


Рисунок 10 – Спектр віброскорості по осі Z при несиметрії фаз  
(—) – исходный сигнал, (○) – основные частоты

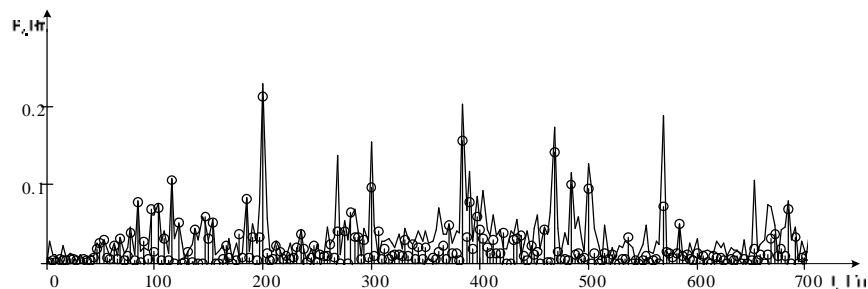


Рисунок 11 – Спектр вібромощності по осі Z при несиметрії фаз  
(—) – исходный сигнал, (○) – основные частоты

**Выводы.** Анализ полученных данных показывает, что вібромощность составляет значительную часть потребляемой мощности АД, что необходимо учитывать в общем энергобалансе при проведении технической диагностики двигателей. Комплексный анализ потребляемой мощности АД, мощности тепловых потерь в его узлах, а также вібромощности позволяет оценить распределение потоков энергии различной физической природы. Разработанный метод позволяет оценить энергетическую составляющую вібромощности для задач диагностики и оценки ресурса механических элементов АД и его креплений.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Вибрации в технике. Справочник. В 6-ти т. / Ред. совет: В. Н. Челомей (пред.). – М.: Машиностроение, 1981. – Т. 5. Измерения и испытания. – Под ред. М. Д. Генкина. – 496 с.
2. Вибрация энергетических машин. Справочное пособие. [Под ред. Григорьева Н. В.] – Л.: Машиностроение, 1974. – 464 с.
3. Вібромощность, излучаемая машинами в присоединенные опорные конструкции. Часть 2. Методика выполнения косвенных измерений: ГОСТ Р 8.653-2009. – [введен в действие 01.01.2010]. – «СТАНДАРТИНФОРМ», Москва, 2009. – 27 с.
4. Устройство для измерения мгновенной мощности механических колебаний: пат. №2189566 С2, Рос.: МПК G01H1/00 / Мартынов В. И., Федяев В. Л., Иванов Д. Ю.; /ЮУрГУ/ заявка №2000119330/28/, опубл. 20.09.2002.

5. Калінов А. П. Автоматизований метод розрахунку електричних кіл за складовими миттєвої потужності / А. П. Калінов, М. С. Малякова // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук: КДУ, 2009. – Вип. 1(5). – С. 34-38.

6. Автоматизация розрахунку складових миттєвої потужності електричних сигналів / [Сидоренко В. М., Родькін Д. Й, Чорний О. П., Мамчур Д. Г.] // Вісник КДПУ: Наукові праці КДПУ. – Кременчук: КДПУ, 2004. – Вип. 3(26). – С. 91-96.

7. Дослідження режимів роботи асинхронних двигунів з пошкодженнями обмоток статора і ротора та з неякісним кріпленням до основи / [Калінов А. П., Мамчур Д. Г., Браташ О. В. та ін.] // Вісник КДПУ: Наукові праці КДПУ. – Вип. 3 (56), ч. 2. – Кременчук: КДПУ ім. М. Остроградського, 2009. – С. 103-107.

Стаття надійшла 07.12.2010 р.  
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.  
Родькіним Д.Й.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВІБРОПОТУЖНОСТІ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

*Браташ О.В., асп., Калінов А.П., к.т.н., доц.*

*Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського*

*вул. Першотравнева, 20, 39600, м. Кременчук, Україна*

*E-mail: [scenter@kdu.edu.ua](mailto:scenter@kdu.edu.ua)*

На підставі проведеного аналізу існуючих методів визначення вібропотужності електричної машини запропонований метод аналітичного розрахунку на основі алгоритму дискретної згортки двох рядів, представлених у вигляді векторів віброшвидкості та віброприскорення. Показано, що вібропотужність асинхронного двигуна може становити значну частину споживаної активної потужності, що необхідно враховувати при проведенні технічної діагностики.

**Ключові слова:** вібропотужність, вібрація, вібродіагностика.

## RESEARCH OF VIBRATION POWER OF INDUCTION MOTOR

*Bratash O., post-grad., Kalinov A., Cand.of Sc.(Tech.), Assoc.Prof.*

*Kremenchuk Mykhailo Ostrogradskyi National University*

*vul. Pershotravneva, 20, 39600, Kremenchuk, Ukraine*

*E-mail: [scenter@kdu.edu.ua](mailto:scenter@kdu.edu.ua)*

In the study, based on analysis of existing methods of determining the vibration power of the electrical machine a method of analytical calculation, was suggested, based on the algorithm of the discrete convolution of two series that are represented as vectors of velocity and acceleration. It is shown that the vibration power of the induction motor (IM) may represent a significant portion of consumed active power, it should be considered during the conduction a technical diagnosis.

**Key words:** vibration power, vibration, vibration monitoring.