

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ТРЕХМАССОВЫХ ВИБРАЦИОННЫХ УСТАНОВОК С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПРИВОДОМ

А. А. Черно, к.т.н., доц., А. П. Гуров, к.т.н., проф., Д. Л. Безверхний, студ.

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев

просп. Героев Сталинграда, 9, 54025, г. Николаев, Украина

E-mail: www.alexicherno@yandex.ru

Предложена методика расчета потребляемой и полезной мощности электромагнитного вибратора в составе трехмассовой вибрационной установки.

Ключевые слова: энергопотребление, электромагнитный вибратор, трехмассовая колебательная система.

Введение. Вибрационные устройства широко применяются в различных областях техники для обеспечения многих технологических процессов [1, 3, 4]. На сегодняшний день наиболее распространены виброустановки с центробежным электроприводом, однако наиболее перспективным является электромагнитный вибрационный привод, основное преимущество которого – значительно меньшее энергопотребление при работе в резонансном или околорезонансном режиме; возможность создавать вибрации с частотой более 100 Гц; возможность управлять амплитудой вибрации независимо от частоты [4]. При проектировании электромагнитных вибраторов возникает задача рационального выбора размеров сердечника, числа витков обмотки и других параметров. При этом необходимо учитывать два противоречивых требования. С одной стороны, вибратор должен иметь небольшую массу электротехнической стали и меди, а с другой стороны – высокий КПД. Для того, чтобы можно было руководствоваться этими требованиями, необходимо, чтобы у разработчика была возможность рассчитать потребляемую мощность электромагнитного вибратора в зависимости от его параметров. Поэтому моделирование электромеханических процессов в колебательных системах с электромагнитными вибраторами и определение их энергопотребления является актуальной задачей.

Анализ предыдущих исследований. В работе [3] предложена конструкция энергосберегающего электромагнитного вибратора с реактивными массами и приведен расчет его потребляемой мощности. При этом рассматривалась трехмассовая колебательная система, в которой две массы входят в состав вибратора (реактивная масса и якорь электромагнита), а третья – масса амортизированного рабочего органа виброустановки. Методика расчета мощности основана на том, что гармонические колебания в трехмассовой системе были описаны тремя комплексными линейными уравнениями, проводимости магнитной цепи рассчитаны методом вероятных путей замыкания магнитного потока, а кривая намагничивания стали аппроксимирована полиномиальной функцией. Недостатком данной методики является то, что одним из входных параметров является амплитуда основной гармонической составляющей электромагнитной силы, которая в большинстве случаев неизвестна.

Цель работы. Разработка методики расчета потребляемой и полезной мощности электромагнитного вибратора в составе трехмассовой вибрационной установки.

Материал и результаты исследования. Рассмотрим трехмассовую вибрационную установку с динамическим виброгасителем на промежуточной платформе (рис. 1).

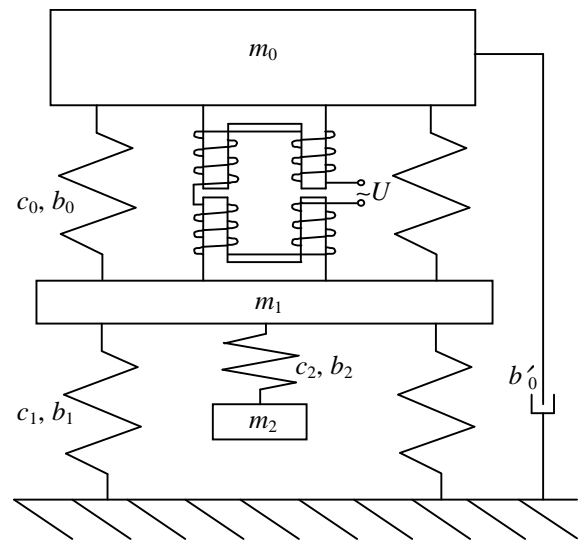


Рисунок 1 – Динамическая схема вибрационной установки с электромагнитным приводом

Составим дифференциальные уравнения, описывающие динамику трехмассовой системы:

$$m_0 \frac{d^2 x_0}{dt^2} + b_0 \left(\frac{dx_0}{dt} - \frac{dx_1}{dt} \right) + b'_0 \frac{dx_0}{dt} + c_0 (x_0(t) - x_1(t)) = F(t);$$

$$m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} + b_0 \left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_0}{dt} \right) + b_1 \frac{dx_1}{dt} + b_2 \left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_2}{dt} \right) + c_0 (x_1(t) - x_0(t)) + c_1 x_1(t) + c_2 (x_1(t) - x_2(t)) = -F(t);$$

$$m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} + b_2 \left(\frac{dx_2}{dt} - \frac{dx_1}{dt} \right) + c_2 (x_2(t) - x_1(t)) = 0,$$

где F – сила, создаваемая электромагнитами; $m_0, x_0; m_1, x_1; m_2, x_2$ – массы и координаты перемещения рабочего органа, промежуточной платформы и динамического виброгасителя соответственно; $c_0, b_0; c_1, b_1$ и c_2, b_2 – жесткости и коэффициенты вязкого трения упругих связей; b'_0 – коэффициенты диссипации энергии в обрабатываемом материале. Преобразовав эти уравнения по Лапласу и решив их со-

вместно относительно x_0, x_1, x_2 , получим следующие соотношения:

$$x_0(p) = W_{x_0}(p)F(p);$$

$$x_1(p) = W_{x_1}(p)F(p);$$

$$x_2(p) = W_{x_2}(p)F(p),$$

где $W_{x_0}(p)$, $W_{x_1}(p)$ и $W_{x_2}(p)$ – передаточные функции, описывающие связь между приложенной силой и координатами перемещения. Для рассматриваемой динамической схемы данные функции имеют следующий вид:

$$W_{x_0}(p) = \frac{A_{0,4}p^4 + A_{0,3}p^3 + A_{0,2}p^2 + A_{0,1}p + A_{0,0}}{D_6p^6 + D_5p^5 + D_4p^4 + D_3p^3 + D_2p^2 + D_1p + D_0};$$

$$W_{x_1}(p) = \frac{A_{1,4}p^4 + A_{1,3}p^3 + A_{1,2}p^2 + A_{1,1}p}{D_6p^6 + D_5p^5 + D_4p^4 + D_3p^3 + D_2p^2 + D_1p + D_0};$$

$$W_{x_2}(p) = \frac{A_{2,3}p^3 + A_{2,2}p^2 + A_{2,1}p}{D_6p^6 + D_5p^5 + D_4p^4 + D_3p^3 + D_2p^2 + D_1p + D_0},$$

где

$$D_0 = c_0c_1c_2; D_1 = b_0c_1c_2 + b'_0c_1c_2 + b'_0c_0c_2 + c_0b_1c_2 + c_0c_1b_2;$$

$$D_2 = c_0b_1b_2 + b_0c_1b_2 + b'_0c_1b_2 + b'_0c_0b_2 + c_0m_1c_2 + b'_0b_1c_2 + b_0b_1c_2 + b'_0b_0c_2 + m_0c_0c_2 + m_0c_1c_2 + c_0c_1m_2 + c_0c_2m_2;$$

$$D_3 = b_0c_2m_2 + b'_0b_1b_2 + b_0c_1m_2 + b'_0c_1m_2 + b_0b_1b_2 + b'_0c_0m_2 + b'_0b_0b_2 + m_0c_1b_2 + m_0c_0b_2 + c_0b_2m_2 + c_0b_1m_2 + m_0b_0c_2 + m_0b_1c_2 + b_0m_1c_2 + b'_0m_1c_2 + c_0m_1b_2 + b'_0c_2m_2;$$

$$D_4 = b'_0b_1m_2 + b_0b_1m_2 + m_0b_1b_2 + b_0b_2m_2 + m_0c_0m_2 + m_0c_1m_2 + b'_0b_2m_2 + b'_0m_1b_2 + m_0m_1c_2 + b_0m_1b_2 + c_0m_1m_2 + m_0c_2m_2 + m_0b_0b_2 + b'_0b_0m_2;$$

$$D_5 = m_0b_1m_2 + b'_0m_1m_2 + m_0b_0m_2 + m_0b_2m_2 + b_0m_1m_2 + m_0m_1b_2; D_6 = m_0m_1m_2;$$

$$A_{0,0} = c_1c_2; A_{0,1} = c_1b_2 + c_2b_1;$$

$$A_{0,2} = m_1c_2 + b_1b_2 + c_1m_2 + c_2m_2;$$

$$A_{0,3} = b_2m_2 + m_1b_2 + b_1m_2; A_{0,4} = m_1m_2;$$

$$A_{1,1} = b'_0c_2; A_{1,2} = m_0c_2 + b'_0b_2;$$

$$A_{1,3} = m_0b_2 + b'_0m_2; A_{1,4} = m_0m_2;$$

$$A_{2,1} = b'_0c_2; A_{2,2} = m_0c_2 + b'_0b_2; A_{2,3} = m_0b_2.$$

Магнитная система электромагнитного вибратора изображена на рис. 2. Составим уравнения, описывающие электромагнитные и электромеханические процессы в системе. Электромагнитная сила, создаваемая вибрационным приводом:

$$F(t) = n_{ЭМ} \frac{B_{\delta}^2(t)S_c}{\mu_0},$$

где $n_{ЭМ}$ – число электромагнитов, входящих в состав вибрационного привода; B_{δ} – магнитная индукция в воздушном зазоре; S_c – площадь сечения сердечника; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная проницаемость воздуха.

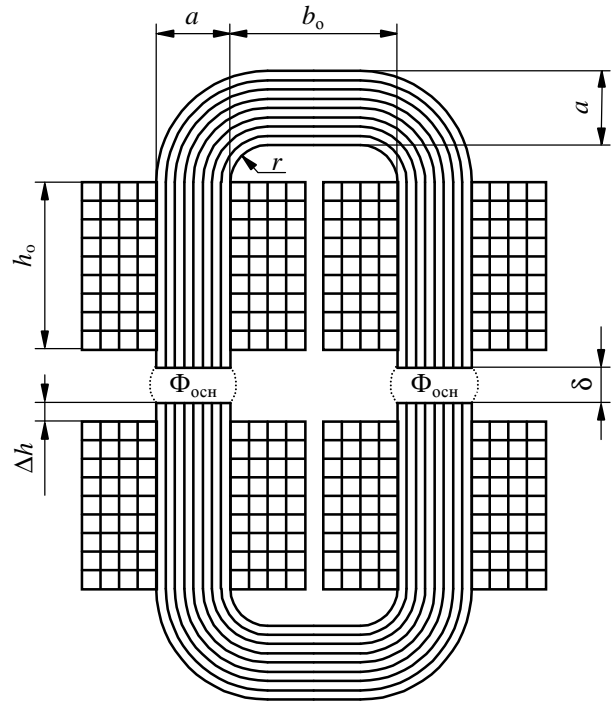


Рисунок 2 – Магнитная система электромагнитного вибратора

Магнитная индукция в зазоре:

$$B_{\delta}(t) = \frac{\Phi_{осн}(t)}{S_c},$$

где $\Phi_{осн}$ – основной магнитный поток (рис. 2).

Магнитная индукция в стали:

$$B(t) = \frac{\Phi(t)}{k_3 S_c},$$

где Φ – общий магнитный поток, k_3 – коэффициент заполнения сердечника электромагнита.

Потоки Φ и $\Phi_{осн}$ определяются следующим образом:

$$\Phi(t) = \Lambda_{\delta}(t) \frac{IW(t) - H(t)l_{ст}}{2};$$

$$\Phi_{осн}(t) = \Lambda_{\delta_{осн}}(t) \frac{IW(t) - H(t)l_{ст}}{2},$$

где $l_{ст}$ – суммарная длина стали сердечника; H – напряженность магнитного поля в стали; Λ_{δ} – магнитная проводимость зазора относительно общего потока; $\Lambda_{\delta_{осн}}$ – магнитная проводимость зазора относительно основного потока.

Кривая намагничивания, отражающая зависимость $H(B)$, может быть аппроксимирована полиномиальной функцией [3]:

$$H(t) = a_1 B(t) + a_3 B(t)^3 + a_{15} B(t)^{15},$$

где a_1 , a_3 и a_{15} – коэффициенты аппроксимирующего полинома, значения которых зависят от марки стали.

Магнитные проводимости Λ_{δ} и $\Lambda_{\delta_{осн}}$ определяются методом вероятных путей замыкания потока [2]:

$$\Lambda_{\delta}(t) = \frac{\mu_0 S_c}{\delta(t)} +$$

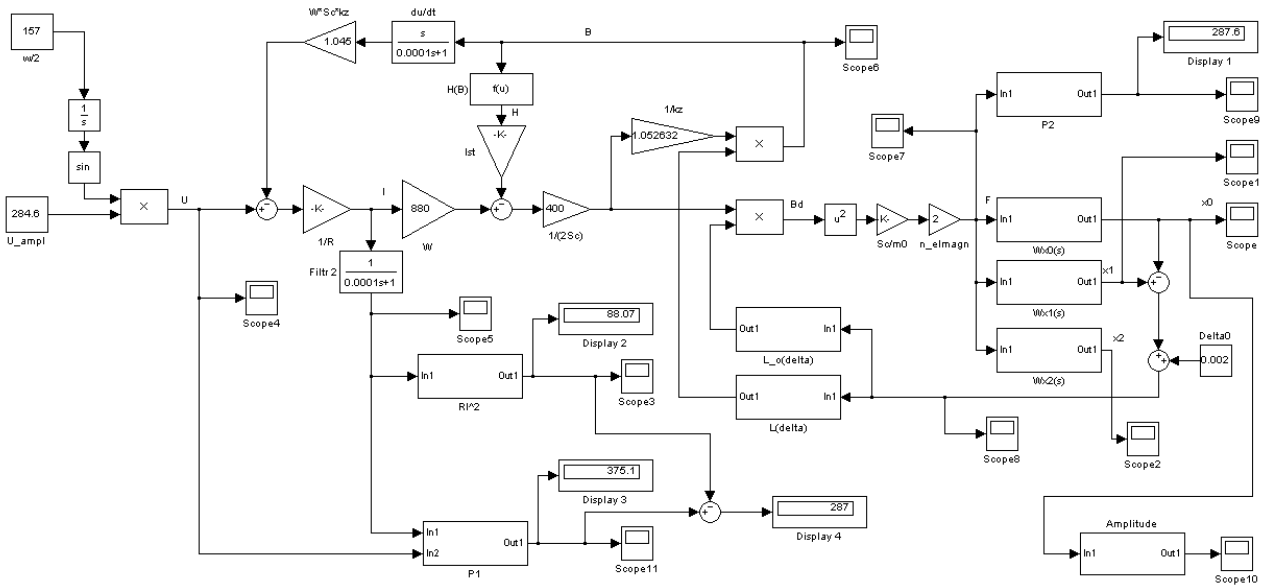


Рисунок 3 – Динамическая модель трехмассовой вибрационной установки в программе Matlab Simulink

$$+ 2\mu_0 \left(0,26(a+b) + \frac{0,64(a+b)}{\frac{\delta(t)}{0,25b_0} + 1} + 2(0,77\delta(t) + 0,25 \cdot 0,25b_0) \right);$$

$$\Lambda_{\delta_{осн}}(t) = \frac{\mu_0 S_c}{\delta(t)} + k_{\Phi} \mu_0 (0,26 \cdot (a+b) + 2 \cdot 0,77\delta(t)), \quad (1)$$

где a и b – ширина и толщина сердечника; b_0 – ширина обмоточного окна; δ – величина воздушного зазора; k_{Φ} – коэффициент, учитывающий часть основного потока, которая исходит из граней сердечника, принадлежащих поверхности S_c .

Закон изменения воздушного зазора во времени:

$$\delta(t) = \delta_0 + x_1(t) - x_0(t),$$

где δ_0 – величина зазора в положении равновесия.

Потокоцепление:

$$\psi(t) = W\Phi(t) = Wk_3 S_c B(t).$$

Ток в обмотке:

$$I(t) = \frac{1}{R} \left(U(t) - \frac{d\psi}{dt} \right),$$

где R – активное сопротивление обмотки.

Потребляемая активная мощность определится как интеграл произведения мгновенных значений тока и напряжения за период колебаний с учетом количества электромагнитов, входящих в состав вибрационного привода $n_{ЭМ}$:

$$P_1 = n_{ЭМ} \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} I(t)U(t)dt.$$

Потери в меди:

$$P_M = n_{ЭМ} \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} I(t)^2 R dt.$$

Полезная мощность:

$$P_2 = P_1 - P_M. \quad (2)$$

С другой стороны, полезная мощность определяется как отношение работы, совершенной якорями электромагнитов за период колебаний, к величине периода [3]:

$$P_2 = -\frac{\omega}{2\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} F(t)v_{\delta}(t)dt, \quad (3)$$

где $v_{\delta}(t) = d\delta/dt$ – скорость изменения воздушного зазора. Соответствие (2) и (3) зависит от правильности выбора коэффициента k_{Φ} в формуле (1).

На основании полученных уравнений была составлена динамическая модель вибрационной установки с помощью программы Matlab Simulink (рис. 3). Методика расчета потребляемой мощности основана на использовании этой модели и состоит в следующем:

- задаются значения параметров электромагнитов и виброустановки, а также первоначальное значение коэффициента k_{Φ} ;

- задаются номинальные значения амплитуды и частоты входного напряжения $U(t)$;

- задается временной интервал таким образом, чтобы в конце моделирования колебания были установившимися (это определяется по показаниям виртуальных осциллографов (рис. 3));

- значение полезной мощности P_2 , рассчитанное по формуле (3), отображается индикатором "Display 1", а по формуле (2) – индикатором "Display 4". Если они не совпадают, необходимо изменить значение коэффициента k_{Φ} и повторить расчет;

- значения потерь в меди P_M и потребляемой мощности P_1 отображаются индикаторами "Display 2" и "Display 3" соответственно.

Данная методика может быть применена не только для трехмассовых вибрационных установок с динамической схемой, приведенной на рис. 1, и магнитной системой, приведенной на рис. 2. При использовании другой динамической схемы доста-

точно заменить передаточные функции $W_{x0}(p)$, $W_{x1}(p)$ и $W_{x2}(p)$, а для другой магнитной системы – использовать другие формулы при вычислении магнитных проводимостей Λ_{δ} и $\Lambda_{\delta \text{ осн}}$. Например, для электромагнитов с U-образным сердечником и якорем в форме параллелепипеда можно использовать формулы, приведенные в [3]:

$$\Lambda_{\delta}(t) = \frac{\mu_0 S}{\delta(t)} + \mu_0 \left(\frac{0,64b(a+2b+0,5b_0)}{\delta(t)+b} + 0,26(a+2b) + 0,154\delta(t) + 0,5b + af \left(\frac{0,5b_0}{\delta(t)} \right) \right);$$

$$\Lambda_{\delta \text{ осн}}(t) = \frac{\mu_0 S}{\delta(t)} + \mu_0 k_{\Phi} \left(0,26(a+2b) + 0,154\delta(t) + af \left(\frac{0,5b_0}{\delta(t)} \right) \right),$$

где $f(x)$ – функциональная зависимость, приведенная в [2] для расчета проводимости между прямоугольным полюсом и проводящей плоскостью.

Используемая динамическая модель может быть также усовершенствована путем введения в нее более точных зависимостей, например, полученных путем численных расчетов магнитного поля.

Выводы. На основании составленных уравнений электромагнитных и электромеханических процессов в трехмассовой вибрационной установке с электромагнитным приводом сформирована ее динамическая модель, которая легла в основу методики расчета потребляемой и полезной мощности. Предложенная методика может быть использована при проектировании электромагнитных вибрационных приводов.

Разработанная динамическая модель является гибкой, поскольку позволяет проводить расчеты для различных динамических схем вибрационных установок и различных магнитных систем вибраторов при внесении в нее соответствующих изменений.

Перспективным направлением является повышение точности разработанной модели и основанной на ней методики расчета потребляемой и полезной мощности электромагнитных вибрационных приводов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т. – М.: Машиностроение, 1981. – Т. 4. – 509 с.
2. Гордон А.В., Сливинская А.С. Электромагниты постоянного тока. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 447 с.
3. Гуров А.П., Черно А.А. Энергосберегающий вибрационный привод на основе электромагнитного вибратора с реактивными массами // Вісник Кременчуцького державного університету ім. М. Остроградського. – 2010. – Вип. 3, ч. 2. – С. 86 – 89.
4. Ланець О.С. Високоєфективні міжрезонансні вібраційні машини з електромагнітним приводом (Теоретичні основи та практика створення): Монографія. – Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2008. – 324 с.

Стаття надійшла 16.06.2011 р.
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.
Чорним О.П

ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ТРЬОХМАСОВИХ ВІБРАЦІЙНИХ УСТАНОВОК З ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ ПРИВОДОМ

О. О. Черно, к.т.н., доц., А. П. Гуров, к.т.н., проф., Д. Л. Безверхній, студ.

*Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв
просп. Героїв Сталінграду, 9, 54025, м. Миколаїв, Україна
E-mail: www.alexcherno@yandex.ru*

Запропоновано методику розрахунку споживаної та корисної потужності електромагнітного вібратора у складі трьохмасової вібраційної установки.

Ключові слова: енергоспоживання, електромагнітний вібратор, трьохмасова коливальна система.

THE PECULIARITY OF THREEMASS RESONANCE VIBRATIONAL DEVICES WITH ELECTROMAGNETIC DRIVE POWER CONSUMPTION CALCULATION

A. Tcherny, Cand.Sc. (Eng.), Assoc. Prof., A. Gurov, Cand.Sc. (Eng.), Prof., D. Bezverhnyi, stud.

*National University of Shipbuilding named by admiral Makarov, Nikolayev
ul. Geroev Stalingrada, 9, 54025, Nikolaev, Ukraine
E-mail: www.alexcherno@yandex.ru*

Methodology of electromagnetic vibrator in the structure of three mass vibrational device power consumption and useful power calculation is proposed.

Key words: power consumption, electromagnetic vibrator, three mass oscillation system