

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВИБРАЦИОННОГО ПРИВОДА

А.А.Черно, канд.техн.наук

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова,
просп. Героев Сталинграда, 9, Николаев, 54025, Украина,
e-mail: AlexTcherno@gmail.com

Создана динамическая модель для исследования электромеханических процессов в вибрационных установках с электромагнитным приводом. В модели учитывается взаимовлияние электромагнитных и механических процессов, нелинейность характеристики намагничивания стали магнитопровода, потоки рассеяния, пространственное распределение магнитного поля, потери на гистерезис и вихревые токи. Приведены результаты экспериментальных исследований, которые подтверждают адекватность предложенной динамической модели. Библ. 9, табл. 2, рис. 5.

Ключевые слова: вибрационная установка, электромагнитный привод, динамическая модель.

Введение. Вибрационные установки находят свое применение в промышленности для обеспечения многих технологических процессов [1–3]. Несмотря на широкое распространение центробежного привода, электромагнитный вибрационный привод имеет ряд преимуществ: высокая надежность, большой рабочий ресурс, простота реализации независимого управления амплитудой и частотой колебаний, возможность создания вибраций с частотой более 100 Гц, высокий КПД при работе на частоте резонанса [6]. Поэтому многие научные работы в Украине [3, 6] и за рубежом [9] посвящены исследованию электромагнитного вибрационного привода с целью его эффективного использования в технологических процессах. Для проведения таких исследований необходимо моделировать электромеханические процессы, протекающие в вибрационном приводе. Поэтому создание динамической модели электромагнитного вибрационного привода является актуальной задачей.

Анализ предыдущих исследований. В работе [9] электромагнитные процессы описываются с помощью приближенных аналитических зависимостей, которые не учитывают нелинейность кривой намагничивания стали и потоки рассеяния. Следует отметить, что перечисленные факторы оказывают существенное влияние на электромеханические процессы, так как электротехническая сталь вибратора периодически входит в насыщение, и при этом потоки рассеяния становятся соизмеримыми с основным магнитным потоком. Поскольку насыщение стали происходит неравномерно, учесть данные факторы возможно только при численном расчете электромагнитного поля. Однако такой расчет затрудняется необходимостью учета движения якоря и обмена энергией с другими подвижными массами колебательной системы.

В последнее время для моделирования динамики электрических машин широко используется подход, основанный на интерполяции результатов численного расчета трехмерного магнитного поля в статике для множества комбинаций значений МДС обмотки и положений подвижной части машины. В работе [8] данный подход был использован для моделирования динамики электромагнитного вибрационного привода. При этом была создана модель (рис. 1, б), основанная на уравнениях

$$IW(t) = WR^{-1} \left(U(t) - Wd\Phi(IW(t), \delta(t)) / dt \right); \quad (1)$$

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

$$m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} + b_0 \left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_0}{dt} \right) + b_1 \frac{dx_1}{dt} + b_2 \left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_2}{dt} \right) + c_0 (x_1(t) - x_0(t)) + c_1 x_1(t) + c_2 (x_1(t) - x_2(t)) = -F(IW(t), \delta(t)); \quad (3)$$

$$m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} + b_2 \left(\frac{dx_2}{dt} - \frac{dx_1}{dt} \right) + c_2 (x_2(t) - x_1(t)) = 0; \quad (4)$$

$$\delta(t) = \delta_0 + x_1(t) - x_0(t), \quad (5)$$

где IW – МДС обмотки; R и W – активное сопротивление и число витков обмотки; U – входное напряжение; F – сила, создаваемая электромагнитом; $m_0, x_0, m_1, x_1, m_2, x_2$ – массы и координаты перемещения рабочего органа, промежуточной платформы и динамического виброгасителя соответственно (рис. 1, а); c_0, b_0, c_1, b_1 и c_2, b_2 – жесткости и коэффициенты вязкого трения упругих связей; b'_0 – коэффициент диссипации энергии в обрабатываемом материале; δ – величина воздушного зазора; δ_0 – величина воздушного зазора в положении равновесия. В динамической модели (рис. 1, б) механика вибрационной установки описывается передаточными функциями 6-го порядка $W_0(p), W_1(p)$ и $W_2(p)$, полученными из уравнений (2) – (4), где p – оператор Лапласа.

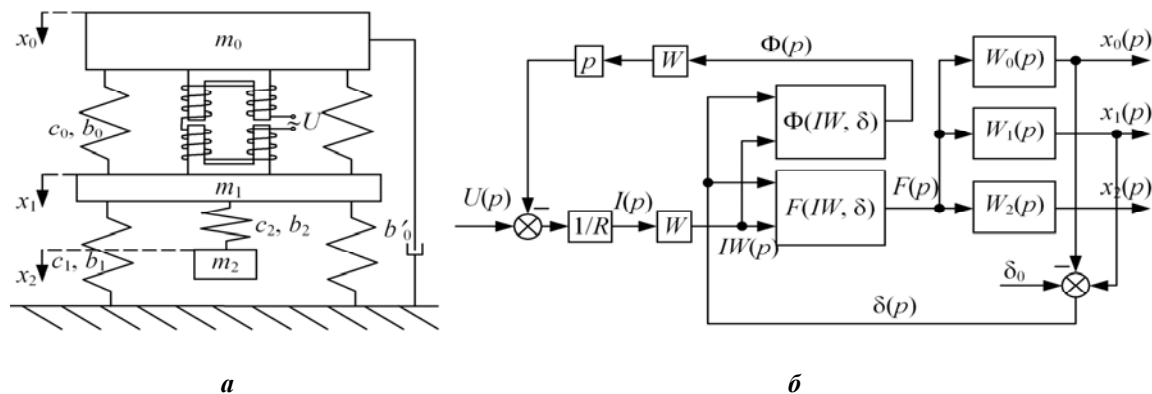


Рис. 1

Значения функций $\Phi(IW, \delta)$ и $F(IW, \delta)$ определяются в процессе моделирования путем интерполяции табличных данных, полученных в результате решения множества полевых задач для различных комбинаций значений IW и δ в статике методом конечных элементов.

Недостаток рассмотренной модели заключается в том, что уравнение (1) не может быть представлено в форме Коши и интегрироваться вместе с остальными уравнениями. В процессе моделирования уравнения механики (2) – (4) преобразовываются в систему из шести дифференциальных уравнений первого порядка и интегрируются методом Рунге-Кутты, а текущее значение МДС IW определяется согласно (1) путем дифференцирования магнитного потока Φ , вычисленного во время предыдущей итерации. Возникающая при этом погрешность на порядки превышает погрешность метода Рунге-Кутты. Для повышения точности расчета необходимо уменьшать шаг итераций, что приводит к значительному увеличению времени моделирования.

Кроме того, в рассмотренной модели не учитываются потери на гистерезис и вихревые токи. Несмотря на то, что эти потери в сумме значительно меньше, чем потери в меди, их нужно учитывать, поскольку они оказывают влияние на динамику электропривода и на его энергопотребление.

Целью данной работы является создание динамической модели электромагнитного вибрационного привода, обеспечивающей высокую точность расчета при относительно небольших затратах машинного времени и учитывающей взаимовлияние электромагнитных и механических процессов, нелинейность характеристики намагничивания стали магнитопровода, потоки рассеяния и пространственное распределение магнитного поля, а также потери на гистерезис и вихревые токи.

Создание динамической модели. Составим эквивалентную схему замещения электрической цепи электромагнитного вибратора (рис. 2).

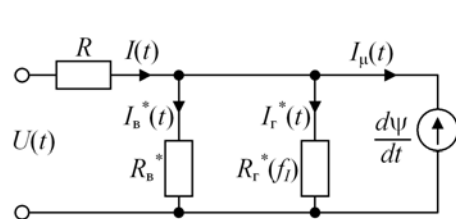


Рис. 2

На схеме приняты обозначения: f_I – частота тока в обмотке; I_μ – составляющая тока, которая создает результирующее магнитное поле; $\psi = W\Phi$ – потокосцепление. Знаком "*" обозначены величины, приведенные к обмотке: $I_B^* = I_B/W$; $I_r^* = I_r/W$; $R_B^* = R_B/W^2$; $R_r^* = R_r/W^2$, где I_B – МДС, создаваемая вихревыми токами; I_r – МДС, которой обусловлена реактивная составляющая намагниченности; R_B – эквивалентное сопротивление контуров замыкания вихревых токов; R_r – фиктивное сопротивление, характеризующее потери на гистерезис.

Потери мощности на гистерезис и вихревые токи

$$P_r = \frac{1}{T_I} \int_t^{t+T_I} (I_r^*(t))^2 R_r^* dt, \quad P_B = \frac{1}{T_I} \int_t^{t+T_I} (I_B^*(t))^2 R_B^* dt, \quad (6, 7)$$

где $T_I = 1/f_I$ – период тока. Потери на гистерезис пропорциональны частоте перемагничивания, а потери на вихревые токи – квадрату частоты [5]. Поэтому при изменяющейся частоте тока в эквивалентной схеме замещения сопротивление R_B^* можно принять постоянным, а сопротивление R_Γ^* – линейно зависящим от частоты:

$$R_\Gamma^*(f_I) = R_{\Gamma,ст}^* \frac{f_I}{f_{I,ст}}, \quad (8)$$

где $R_{\Gamma,ст}^*$ – значение сопротивления R_Γ^* при стандартной частоте $f_{I,ст}$, для которой приведены справочные данные по потерям [5]. Поскольку противо-ЭДС $d\psi/dt$ пропорциональна частоте, при изменении последней амплитуда тока I_Γ^* будет оставаться постоянной, а сопротивление R_Γ^* и потери P_Γ будут изменяться пропорционально частоте.

Используя схему замещения (рис. 2) с учетом (8), составляем уравнения

$$I(t) = R^{-1}U(t) - WR^{-1}d\Phi(IW_{эKB}(t), \delta(t))/dt; \quad IW_{эKB}(t) = W \cdot (I(t) - I_B^*(t) - I_\Gamma^*(t)); \quad (9, 10)$$

$$I_\Gamma^*(t) = \frac{f_{I,ст}}{R_{\Gamma,ст}^* f_I(t)} (U(t) - RI(t)); \quad I_B^*(t) = \frac{1}{R_B^*} (U(t) - RI(t)), \quad (11, 12)$$

где $IW_{эKB} = I_\mu W$ – эквивалентная МДС, создающая результирующее магнитное поле. На основании уравнений (9) – (12) и (2) – (5) можно составить динамическую модель, аналогичную предложенной в [8], но учитывающую потери в стали. Величины R_B^* и $R_{\Gamma,ст}^*$ должны быть подобраны в результате моделирования таким образом, чтобы при стандартной частоте и амплитуде магнитной индукции потери на гистерезис и вихревые токи, рассчитанные по (6), (7), соответствовали справочным данным [5], приведенным для тех же условий.

Для обеспечения высокой точности расчета при сравнительно небольшом времени моделирования необходимо избавиться от процедуры дифференцирования в уравнении (9), представив его в форме Коши. Для этого нужно перейти от функции $\Phi(IW_{эKB}, \delta)$ к обратной функции $IW_{эKB}(\Phi, \delta)$. То есть необходимо обеспечить возможность в процессе моделирования определять мгновенные значения эквивалентной МДС в зависимости от мгновенных значений магнитного потока и величины воздушного зазора. Для этого нужно таблицу значений магнитного потока Φ , полученных путем решения трехмерной полевой задачи для разных значений МДС и δ [8], преобразовать в таблицу значений $IW_{эKB}$ для разных Φ и δ . Представим исходную таблицу в виде матриц

$$IW_{эKB} = \left((IW_{эKB})_1 \quad (IW_{эKB})_2 \quad \dots \quad (IW_{эKB})_{N_{IW}} \right)^T; \quad \delta = \left(\delta_1 \quad \delta_2 \quad \dots \quad \delta_{N_\delta} \right)^T; \quad (13, 14)$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} \Phi_{1,1} & \Phi_{1,2} & \dots & \Phi_{1,N_{IW}} \\ \Phi_{2,1} & \Phi_{2,2} & \dots & \Phi_{2,N_{IW}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Phi_{N_\delta,1} & \Phi_{N_\delta,2} & \dots & \Phi_{N_\delta,N_{IW}} \end{bmatrix}, \quad (15)$$

где $\Phi_{i,j}$ – значения магнитного потока, рассчитанные при МДС обмотки $(IW_{эKB})_j$ и величине воздушного зазора δ_i ; N_{IW} – число варьируемых значений МДС; N_δ – число варьируемых значений δ . Интерполируем каждую строку матрицы (13) сплайн-функцией $spline_i(IW_{эKB})$. Зададим N_Φ значений магнитного потока

$$\Phi = \left(\Phi_1 \quad \Phi_2 \quad \dots \quad \Phi_{N_\Phi} \right)^T. \quad (16)$$

Находим значения МДС обмотки $(IW_{эKB})_{i,k}$, соответствующие значениям Φ_k и δ_i , путем решения уравнений

$$spline_i((IW_{эKB})_{i,k}) = \Phi_k \quad \text{при} \quad k = 1 \dots N_\Phi; \quad i = 1 \dots N_\delta,$$

где i – номер строки. В результате получаем матрицу значений эквивалентной МДС

$$IW_{эKB} = \begin{bmatrix} (IW_{эKB})_{1,1} & (IW_{эKB})_{1,2} & \dots & (IW_{эKB})_{1,N_\Phi} \\ (IW_{эKB})_{2,1} & (IW_{эKB})_{2,2} & \dots & (IW_{эKB})_{2,N_\Phi} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ (IW_{эKB})_{N_\delta,1} & (IW_{эKB})_{N_\delta,2} & \dots & (IW_{эKB})_{N_\delta,N_\Phi} \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Таким образом, табличная зависимость $\Phi(IW_{эKB}, \delta)$, заданная матрицами (13)–(15), преобразовывается в табличную зависимость $IW_{эKB}(\Phi, \delta)$, заданную матрицами (14), (16), (17). Путем интерпо-

лляции этой зависимости получаем непрерывную функцию, что позволяет на основании (9) и (10) составить следующее уравнение:

$$d\Phi/dt = W^{-1} \left\{ U(t) - R \cdot \left[W^{-1} I W_{\text{эКВ}}(\Phi(t), \delta(t)) + I_z^*(t) + I_e^*(t) \right] \right\}. \quad (18)$$

Поскольку уравнение (18) представлено в форме Коши, оно может быть проинтегрировано совместно с другими уравнениями системы методом Рунге-Кутты без выполнения операций численного дифференцирования. Это позволит достичь требуемой точности расчета при значительно меньшем количестве итераций по сравнению с динамической моделью (рис. 1, б).

Составим в операторной форме уравнения механики для произвольного числа масс колебательной системы, считая, что электромагнитный вибратор входит в состав 0-й и 1-й массы

$$\begin{cases} M_{0,0}(p)x_0(p) + M_{0,1}(p)x_1(p) + M_{0,2}(p)x_2(p) + \dots + M_{0,n-1}(p)x_{n-1}(p) = F(IW_{\text{эКВ}}(p), \delta(p)); \\ M_{1,0}(p)x_0(p) + M_{1,1}(p)x_1(p) + M_{1,2}(p)x_2(p) + \dots + M_{1,n-1}(p)x_{n-1}(p) = -F(IW_{\text{эКВ}}(p), \delta(p)); \\ M_{2,0}(p)x_0(p) + M_{2,1}(p)x_1(p) + M_{2,2}(p)x_2(p) + \dots + M_{2,n-1}(p)x_{n-1}(p) = 0; \\ \vdots \\ M_{n-1,0}(p)x_0(p) + M_{n-1,1}(p)x_1(p) + M_{n-1,2}(p)x_2(p) + \dots + M_{n-1,n-1}(p)x_{n-1}(p) = 0, \end{cases} \quad (19)$$

где $M_{i,i}(p) = m_i p^2 + \sum_{j=0}^{n-1} (b_{i,j} p + c_{i,j})$; $M_{i,j}(p) = -(b_{i,j} p + c_{i,j})$ при $i \neq j$; m_i – i -я масса; $b_{i,j}$ и $c_{i,j}$ – соот-

ветственно коэффициент вязкого трения и жесткость упругой связи между i -й и j -й массами при $i \neq j$; $c_{i,i}$ – жесткость упругой связи между i -й массой и фундаментом; $b_{i,i}$ – коэффициент силы вязкого трения, пропорциональной абсолютной скорости i -й массы (трение в амортизаторах и сила сопротивления, обусловленная диссипацией энергии в обрабатываемом материале); n – число масс.

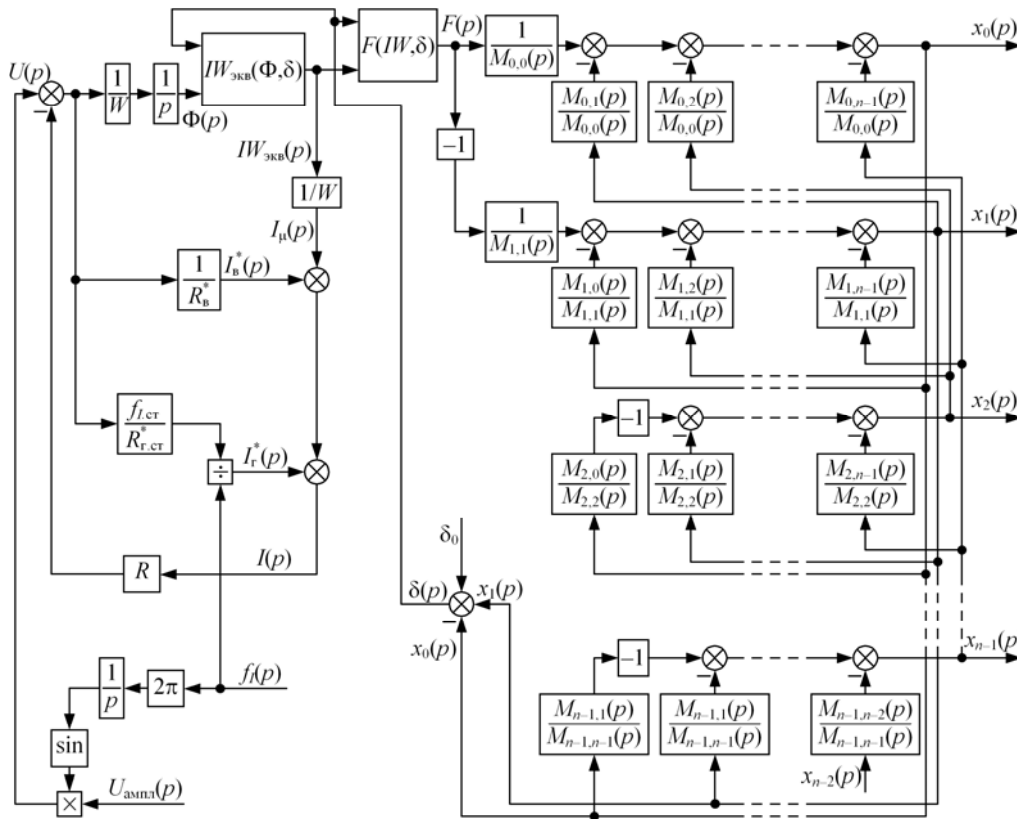


Рис. 3

На основании уравнений (11, 12), (18,19) с учетом (5) была построена динамическая модель электромагнитного вибратора, которая показана на рис. 3 в виде структурной схемы, где обозначено: $U_{\text{ампл}}$ – амплитуда подаваемого на обмотку напряжения. В случае моделирования процессов в электроприводе при не синусоидальном входном напряжении необходимо в модели (рис. 3) заменить блок "sin" другим блоком, определяющим функцию изменения входного напряжения во времени.

Моделирование электромеханических процессов.

На рис. 4 представлена реализация разработанной динамической модели в программе Simulink, а на рис. 5 – рассчитанные с ее помощью графи-

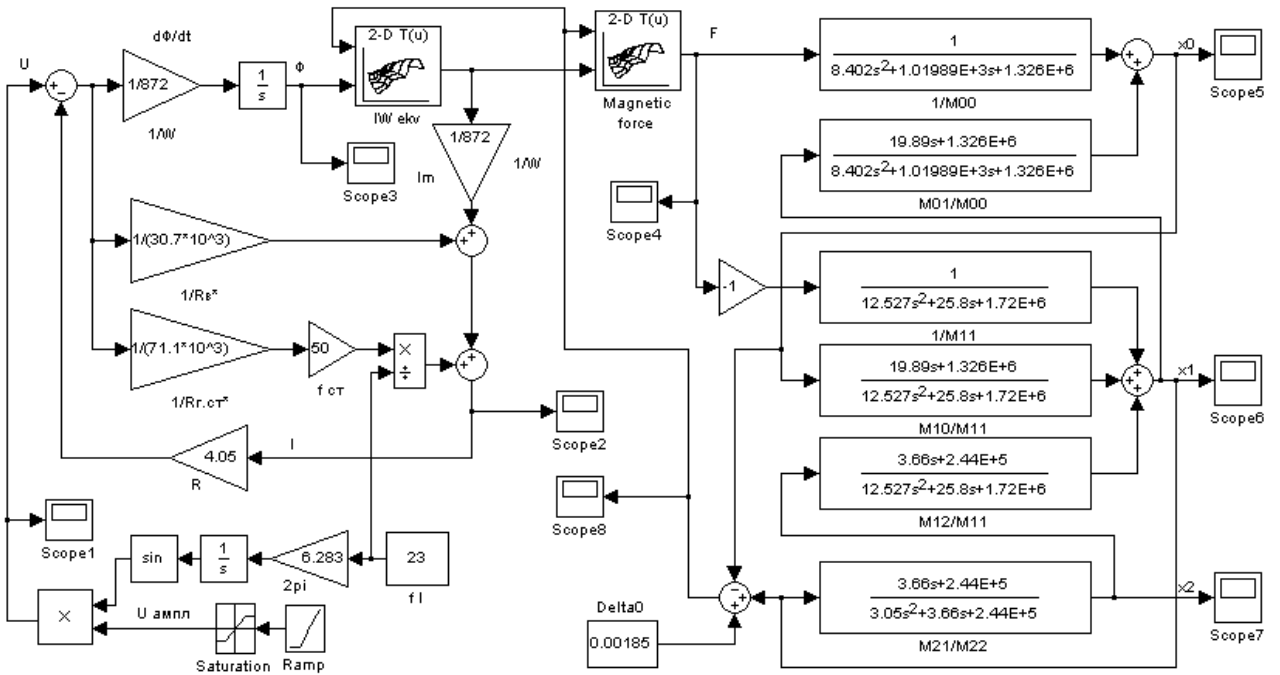


Рис. 4

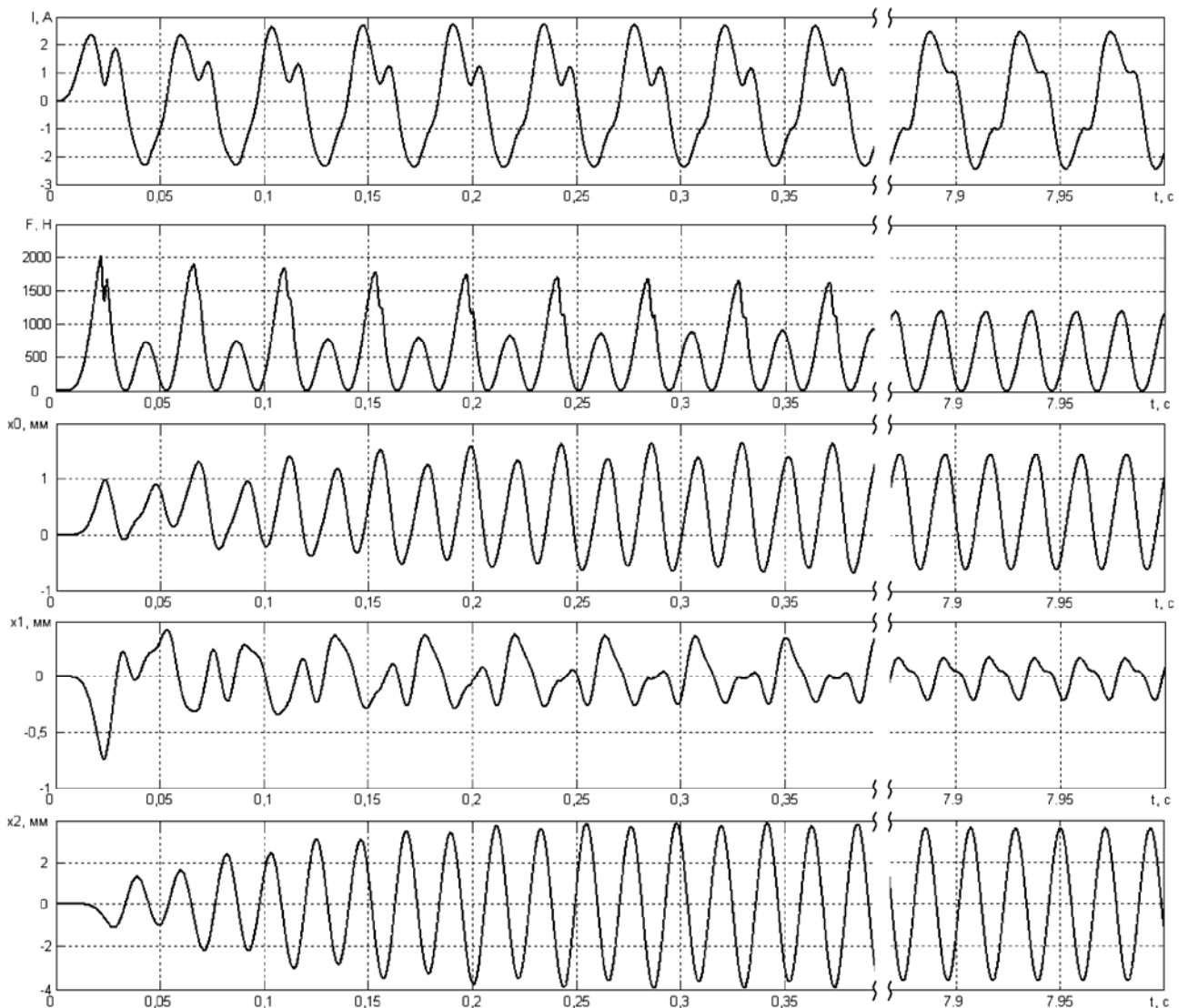


Рис. 5

ки переходных процессов при включении электромагнитного привода трехмассовой вибрационной установки. Адекватность модели можно косвенно проверить по сходимости баланса мощностей

$$P_{\text{потр}} = P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{м}} + \Delta P_{\text{в}} + \Delta P_{\text{г}},$$

где $P_{\text{потр}}$ – потребляемая мощность; $P_{\text{мех}}$ – механическая мощность; $\Delta P_{\text{м}}$ – потери в меди. Потери на гистерезис $\Delta P_{\text{г}}$ и потери на вихревые токи $\Delta P_{\text{в}}$ определяются согласно (6) и (7). Составляющие мощности $P_{\text{потр}}$, $P_{\text{мех}}$ и $\Delta P_{\text{м}}$ определяются следующими выражениями:

$$P_{\text{потр}} = \frac{1}{T_I} \int_t^{t+T_I} I(t)U(t)dt; \quad P_{\text{мех}} = \frac{1}{T_I} \int_t^{t+T_I} F(t)v(t)dt; \quad \Delta P_{\text{м}} = \frac{1}{T_I} \int_t^{t+T_I} (I(t))^2 R dt,$$

где v – относительная скорость якоря и сердечника электромагнитного вибратора.

Для оценки сходимости баланса мощностей будем использовать относительную ошибку

$$\varepsilon_p = \left| P_{\text{потр}} - (P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{м}} + \Delta P_{\text{в}} + \Delta P_{\text{г}}) \right| (P_{\text{потр}})^{-1} \cdot 100\%.$$

Результаты расчета (табл. 1) показывают, что баланс мощностей сходится с высокой точностью.

Таблица 1

$P_{\text{потр}}$, Вт	$P_{\text{мех}}$, Вт	$\Delta P_{\text{м}}$, Вт	$\Delta P_{\text{в}}$, Вт	$\Delta P_{\text{г}}$, Вт	ε_p , %
62,09	47,74	12,61	0,7	0,65	0,63

Экспериментальные исследования.

Для минимизации факторов, влияющих на результаты экспериментов, использовалась одномассовая колебательная система. На обмотку электромагнитного вибратора подавалось синусоидальное напряжение и фиксировались осциллограммы тока в обмотке $I(t)$ и виброускорения подвижной массы $a(t)$ (рис. 6, кривые 1). Для сравнения показаны и соответствующие осциллограммы, полученные расчетным путем (кривые 2).

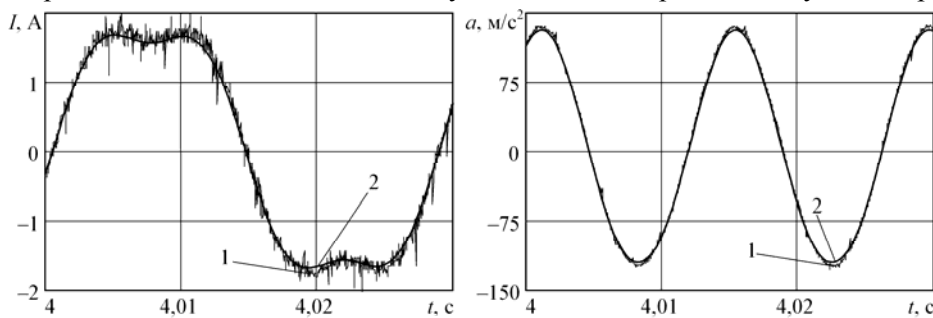


Рис. 6

Данный эксперимент проводился многократно при пяти разных амплитудах входного напряжения, для которых затем были определены действующие значения тока I_d и амплитудные значения виброперемещения X . С помощью критерия Кохрена [4] эксперимент был проверен на

воспроизводимость ($G < G_{\text{кр}}$). Для каждой из величин I_d и X была определена инструментальная погрешность [7]

$$\varepsilon_{\text{инстр}}(Y) = 100\% Y^{-1} \sqrt{(\Delta U_a \cdot \partial Y / \partial U_a)^2 + (\Delta \delta \cdot \partial Y / \partial \delta)^2 + (\Delta \omega_r \cdot \partial Y / \partial \omega_r)^2 + (\Delta c \cdot \partial Y / \partial c)^2 + \Delta Y^2},$$

где Y – определяемая величина (I_d или X); ΔU_a , $\Delta \delta$, $\Delta \omega_r$, Δc и ΔY – погрешности измерения амплитуды напряжения, величины воздушного зазора, резонансной частоты, жесткости подвеса и определяемой величины соответственно. Случайные погрешности, найденные с помощью коэффициента Стьюдента [4], на 2 порядка меньше инструментальных, поэтому ими можно пренебречь.

Результаты статистической обработки экспериментов приведены в табл. 2.

Таблица 2

U_a , В	$I_{\text{д.эксп}}$, А	$I_{\text{д.теор}}$, А	ε_I , %	$\varepsilon_{\text{инстр}}(I)$, %	$X_{\text{эксп}}$, мм	$X_{\text{теор}}$, мм	ε_X , %	$\varepsilon_{\text{инстр}}(X)$, %
149	1,136	1,09	4,1	4,4	0,2979	0,303	1,7	4,0
171	1,254	1,209	3,6	4,7	0,4047	0,4101	1,3	4,0
188	1,332	1,29	3,1	5,1	0,5095	0,5119	0,5	4,2
201	1,379	1,341	2,8	5,5	0,6045	0,602	0,4	4,5
215	1,411	1,382	2,0	5,9	0,728	0,7112	2,3	4,5

Относительные отклонения теоретических результатов от экспериментальных ε_I и ε_X не превышают соответствующих инструментальных погрешностей. Это означает, что проведенные эксперименты подтверждают адекватность разработанной динамической модели.

Выводы. Созданная динамическая модель позволяет рассчитывать электромеханические процессы в электромагнитном приводе многомассовых вибрационных установок с высокой точностью. Погрешность расчета составляющих мощности электромагнитного привода не превышает 1%. Максимальное расхождение между результатами расчетов и опытов составляет 4,1% по действующему

значенню тока и 2,3% по амплитуде вибрации, что не превышает инструментальной погрешности эксперимента.

1. Бондар Р.П., Голенков Г.М., Мазуренко Л.И., Подольцев О.Д. Моделирование многокомпонентного колебательно-го руху вібраційної системи з лінійним електроприводом // Технічна електродинаміка. – 2012. – №1. – С. 49–56.
2. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т. – М.: Машиностроение, 1981. – Т. 4. – 509 с.
3. Виштак Т.В., Кондратенко И.П., Ращепкин А.П. Динамические режимы электромагнитного вибратора // Технічна електродинаміка. – 2011. – №3. – С. 60–66.
4. Гмурман В.Е. Теория вероятности и математическая статистика. – М.: Высш. школа, 2003. – 480 с.
5. Дружинин В.В. Магнитные свойства электротехнической стали. – М.: Энергия, 1974. – 240 с.
6. Ланець О.С. Високоєфективні міжрезонансні вібраційні машини з електромагнітним приводом (Теоретичні основи та практика створення): Монографія. – Львів: НУЛП, 2008. – 324 с.
7. Савчук В.П. Обработка результатов измерений. Физическая лаборатория. Ч.1: Учебн. пособие для студентов вузов. – Одесса: ОНПУ, 2002. – 54 с.
8. Черно А.А., Гуров А.П., Минчула А.С., Безверхний Д.Л. Моделирование электромеханических процессов в энергосберегающих электромагнитных приводах вибрационных установок // Электротехнические и компьютерные системы. – К.: Техніка, 2011. – №3. – С. 397–399.
9. Despotovic Z.V., Stojiljkovic Z.V. Power Converter Control Circuits for Two-Mass Vibratory Conveying System with Electromagnetic Drive: Simulations and Experimental Results // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2007. – Vol. 54. – Issue 1. – Pp. 453–466.

УДК 621.313.3:621.318.3

ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВІБРАЦІЙНОГО ПРИВОДА

О.О.Черно, канд.техн.наук

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова,
просп. Героїв Сталінграду, 9, Миколаїв, 54025, Україна, e-mail: AlexTcherno@gmail.com

Створено динамічну модель для дослідження електромеханічних процесів у вібраційних установках з електромагнітним приводом. В моделі враховується взаємовплив електромагнітних та механічних процесів, нелінійність характеристики намагнічування сталі магнітопроводу, потоки розсіювання, просторовий розподіл магнітного поля, втрати на гістерезис та вихрові струми. Наведено результати експериментальних досліджень, які підтверджують адекватність запропонованої динамічної моделі. Бібл. 9, табл. 2, рис. 5.

Ключові слова: вібраційна установка, електромагнітний привод, динамічна модель.

DYNAMIC MODEL OF ELECTROMAGNETIC VIBRATION DRIVE

O.O.Tcherno

National University of Shipbuilding named by admiral Makarov,
av. Heroiv Stalingradu, 9, Mykolaiv, 54025, Ukraine, e-mail: AlexTcherno@gmail.com

A dynamic model to investigate the electromechanical processes in multimass vibration devices with electromagnetic drive is proposed. The model is based on the interpolation of the results of magnetostatics numerical solution by finite element method and the differential equations describing the dynamics of electromagnetic and mechanical processes. The model takes into account the nonlinearity of the steel B-H curve, three-dimensional distribution of the magnetic field, leakage fluxes, eddy currents, hysteresis, oscillating masses elastic interaction, the viscous friction force, the mutual influence of electromagnetic and mechanical processes. The experimental investigation results confirm the adequacy of the dynamic model. References 9, tables 2, figures 5.

Key words: vibration device, electromagnetic drive, dynamic model.

1. Bondar R.P., Holenkov H.M., Mazurenko L.I., Podoltsev O.D. Modeling of a multicomponent oscillatory motion of the vibration system with linear electric drive // Tekhnichna elektrodynamika. – 2012. – №1. – Pp. 49–56. (Ukr)
2. Vibrations in the technique: Reference book. In 6 vol. – Moskva: Mashinostroenie, 1981. – Vol. 4. – 509 p. (Rus)
3. Vishtak T.V., Kondratenko I.P., Rashchepkin A.P. Dynamic modes of the electromagnetic oscillator // Tekhnichna elektrodynamika. – 2011. – №3. – Pp. 60–66. (Rus)
4. Gmurman V.E. The probability theory and mathematical statistics. – Moskva: Vysshaya shkola, 2003. – 480 p. (Rus)
5. Druzhinin V.V. The magnetic properties of electrical steel. – Moskva: Energiia, 1974. – 240 p. (Rus)
6. Lanets O.S. High efficiency interresonance vibrating machines with electromagnetic drive (Theoretical foundations and building practice): Manuscript. – Lviv: NULP, 2008. – 324 p. (Ukr)
7. Savchuk V.P. Processing of measurement results. Physical Laboratory. Vol. 1: Textbook for students of colleges. – Odessa: ONPU, 2002. – 54 p. (Rus)
8. Tchernov A.A., Gurov A.P., Minchula A.S., Bezverkhny D.L. The modeling of electromechanical processes in energy-efficient electromagnetic drives of vibration devices // Elektrotehnicheskie i kompiuternye sistemy. – Kyiv: Tekhnika, 2011. – №3. – Pp. 397–399. (Rus)
9. Despotovic Z.V., Stojiljkovic Z.V. Power Converter Control Circuits for Two-Mass Vibratory Conveying System with Electromagnetic Drive: Simulations and Experimental Results // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2007. – Vol. 54. – Issue 1. – Pp. 453–466.

Надійшла 15.07.2013