

АППРОКСИМАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОАМОРТИЗАТОРА

В роботі представлена структура визначення апроксимуючого полінома, що дозволяє ідентифікувати потোকосцеплення та електромагнітну силу математичної моделі електроамортизатора.

В работе представлена структура определения аппроксимирующего полинома, позволяющего идентифицировать потোকосцепление и электромагнитную силу математической модели электроамортизатора.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ДОСТИЖЕНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Современные электромеханические преобразователи энергии стремятся создавать с максимальным использованием активных материалов. Это стремление приводит к созданию высокоиспользуемых устройств, в которых электромагнитные параметры характеризуются значительными нелинейностями системы. К таким типам электромеханических преобразователей относится электроамортизатор, конструкция которого приведена в работе [1].

Для моделирования режимов работы электроамортизатора была предложена математическая модель, созданная на основе уравнений Лагранжа для электромеханической системы. Модель, приведенная в работе [2], позволяет учесть нелинейность участков магнитной цепи электроамортизатора. Для идентификации параметров линейного электромеханического преобразователя (ЭМП) – электроамортизатора транспортного средства предлагается использовать метод конечных элементов, который позволяет, задав конструктивные, электрические и магнитные параметры, получить показатели потোকосцепления и электромеханической силы [3]. Определение расчетных показателей модели для принятого варианта исходных данных, с учетом основных факторов, может составлять 5-7 дней с использованием современных компьютеров. Выполненные расчеты с использованием МКЭ позволяют получить цифровую модель магнитного поля линейного ЭМП-амортизатора. Однако результаты данной модели дискретны. Для получения непрерывных зависимостей, идентифицирующих параметры математической модели, необходимо аппроксимировать дискретные зависимости непрерывными функциями.

ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Определение непрерывных зависимостей потোকосцеплений и электромагнитной силы электроамортизатора линейного типа транспортного средства с использованием полиномов Чебышева.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Математическая модель электроамортизатора, состоящая из уравнений электрического и механического равновесия представленная в работе [2], имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{di_1}{dt} = \frac{D_A}{D}; \\ \frac{di_2}{dt} = \frac{D_B}{D}; \\ \frac{di_3}{dt} = \frac{D_C}{D}; \\ F_e - \alpha v - F_C = m_{np} \frac{dv}{dt}; \\ v = \frac{dx}{dt}, \end{cases} \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} D &= \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_1} \cdot \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_2} \cdot \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_3} + \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_2} \cdot \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_3} \cdot \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_1} + \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_3} \cdot \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_1} \cdot \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_2} - \\ &- \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_3} \cdot \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_2} \cdot \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_1} - \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_1} \cdot \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_3} \cdot \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_2} - \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_2} \cdot \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_1} \cdot \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_3}; \\ D_A &= \left[e_1 - \frac{\partial \Psi'_A}{\partial x} \cdot v - r_1 i_1 \right] \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_2} \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_3} + \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_2} \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_3} \left[e_3 - \frac{\partial \Psi'_C}{\partial x} \cdot v - r_3 i_3 \right] + \\ &+ \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_3} \left[e_2 - \frac{\partial \Psi'_B}{\partial x} \cdot v - r_2 i_2 \right] \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_2} - \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_3} \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_2} \left[e_3 - \frac{\partial \Psi'_C}{\partial x} \cdot v - r_3 i_3 \right] - \\ &- \left[e_1 - \frac{\partial \Psi'_A}{\partial x} \cdot v - r_1 i_1 \right] \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_3} \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_2} - \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_2} \left[e_2 - \frac{\partial \Psi'_B}{\partial x} \cdot v - r_2 i_2 \right] \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_3}; \\ D_B &= \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_1} \left[e_2 - \frac{\partial \Psi'_B}{\partial x} \cdot v - r_2 i_2 \right] \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_3} + \left[e_1 - \frac{\partial \Psi'_A}{\partial x} \cdot v - r_1 i_1 \right] \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_3} \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_1} + \\ &+ \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_3} \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_1} \left[e_3 - \frac{\partial \Psi'_C}{\partial x} \cdot v - r_3 i_3 \right] - \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_3} \left[e_2 - \frac{\partial \Psi'_B}{\partial x} \cdot v - r_2 i_2 \right] \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_1} - \\ &- \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_1} \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_3} \left[e_3 - \frac{\partial \Psi'_C}{\partial x} \cdot v - r_3 i_3 \right] - \left[e_1 - \frac{\partial \Psi'_A}{\partial x} \cdot v - r_1 i_1 \right] \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_1} \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_3}; \\ D_C &= \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_1} \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_2} \left[e_3 - \frac{\partial \Psi'_C}{\partial x} \cdot v - r_3 i_3 \right] + \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_2} \left[e_2 - \frac{\partial \Psi'_B}{\partial x} \cdot v - r_2 i_2 \right] \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_1} + \\ &+ \left[e_1 - \frac{\partial \Psi'_A}{\partial x} \cdot v - r_1 i_1 \right] \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_1} \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_2} - \left[e_1 - \frac{\partial \Psi'_A}{\partial x} \cdot v - r_1 i_1 \right] \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_2} \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_1} - \\ &- \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_1} \left[e_2 - \frac{\partial \Psi'_B}{\partial x} \cdot v - r_2 i_2 \right] \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_2} - \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_2} \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_1} \left[e_3 - \frac{\partial \Psi'_C}{\partial x} \cdot v - r_3 i_3 \right]; \\ \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_1} &= \frac{\partial \Psi_A}{\partial i_1} + \frac{\partial \left[\int_0^{i_2} \Psi_B(i_1, i_2, i_3, x) di_2 \right]^2}{\partial^2 i_1} + \frac{\partial \left[\int_0^{i_3} \Psi_N(i_1, i_2, i_3, x) di_3 \right]^2}{\partial^2 i_1}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_2} &= \frac{\partial \Psi_A}{\partial i_2} - \frac{\partial \Psi_A(i_1, 0, i_3, x)}{\partial i_2} + \frac{\partial \Psi_B}{\partial i_1} - \frac{\partial \Psi_B(0, i_2, i_3, x)}{\partial i_1} + \frac{\left[\int_0^{i_3} \Psi_C(i_1, i_2, i_3, x) di_3 \right]^2}{\partial i_1 \partial i_2}; \\ \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_3} &= \frac{\partial \Psi_A}{\partial i_3} - \frac{\partial \Psi_A(i_1, i_2, 0, x)}{\partial i_3} + \frac{\partial \Psi_C}{\partial i_1} - \frac{\partial \Psi_C(0, i_2, i_3, x)}{\partial i_1} + \frac{\left[\int_0^{i_2} \Psi_B(i_1, i_2, i_3, x) di_2 \right]^2}{\partial i_1 \partial i_3}; \\ \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_1} &= \frac{\partial \Psi_A}{\partial i_2} - \frac{\partial \Psi_A(i_1, 0, i_3, x)}{\partial i_2} + \frac{\partial \Psi_B}{\partial i_1} - \frac{\partial \Psi_B(0, i_2, i_3, x)}{\partial i_1} + \frac{\left[\int_0^{i_3} \Psi_C(i_1, i_2, i_3, x) di_3 \right]^2}{\partial i_1 \partial i_2}; \\ \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_2} &= \frac{\partial \Psi_B}{\partial i_2} + \frac{\left[\int_0^{i_1} \Psi_A(i_1, i_2, i_3, x) di_1 \right]^2}{\partial^2 i_2} + \frac{\left[\int_0^{i_3} \Psi_C(i_1, i_2, i_3, x) di_3 \right]^2}{\partial^2 i_2}; \\ \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_3} &= \frac{\partial \Psi_B}{\partial i_3} - \frac{\partial \Psi_B(i_1, i_2, 0, x)}{\partial i_3} + \frac{\partial \Psi_C}{\partial i_2} - \frac{\partial \Psi_C(i_1, 0, i_3, x)}{\partial i_2} + \frac{\left[\int_0^{i_1} \Psi_A(i_1, i_2, i_3, x) di_1 \right]^2}{\partial i_2 \partial i_3}; \\ \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_1} &= \frac{\partial \Psi_A}{\partial i_3} - \frac{\partial \Psi_A(i_1, i_2, 0, x)}{\partial i_3} + \frac{\partial \Psi_C}{\partial i_1} - \frac{\partial \Psi_C(0, i_2, i_3, x)}{\partial i_1} + \frac{\left[\int_0^{i_2} \Psi_B(i_1, i_2, i_3, x) di_2 \right]^2}{\partial i_1 \partial i_3}; \\ \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_2} &= \frac{\partial \Psi_B}{\partial i_3} - \frac{\partial \Psi_B(i_1, i_2, 0, x)}{\partial i_3} + \frac{\partial \Psi_C}{\partial i_2} - \frac{\partial \Psi_C(i_1, 0, i_3, x)}{\partial i_2} + \frac{\left[\int_0^{i_1} \Psi_A(i_1, i_2, i_3, x) di_1 \right]^2}{\partial i_2 \partial i_3}; \\ \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_3} &= \frac{\partial \Psi_C}{\partial i_3} + \frac{\left[\int_0^{i_1} \Psi_A(i_1, i_2, i_3, x) di_1 \right]^2}{\partial^2 i_3} + \frac{\left[\int_0^{i_2} \Psi_B(i_1, i_2, i_3, x) di_2 \right]^2}{\partial^2 i_3}; \\ \frac{\partial \Psi'_A}{\partial x} &= \frac{\partial \Psi_A}{\partial x} + \frac{\left[\int_0^{i_2} \Psi_B(i_1, i_2, i_3, x) di_2 \right]^2}{\partial i_1 \partial x} + \frac{\left[\int_0^{i_3} \Psi_C(i_1, i_2, i_3, x) di_3 \right]^2}{\partial i_1 \partial x}; \\ \frac{\partial \Psi'_B}{\partial x} &= \frac{\partial \Psi_B}{\partial x} + \frac{\left[\int_0^{i_1} \Psi_A(i_1, i_2, i_3, x) di_1 \right]^2}{\partial i_2 \partial x} + \frac{\left[\int_0^{i_3} \Psi_C(i_1, i_2, i_3, x) di_3 \right]^2}{\partial i_2 \partial x}; \\ \frac{\partial \Psi'_C}{\partial x} &= \frac{\partial \Psi_C}{\partial x} + \frac{\left[\int_0^{i_1} \Psi_A(i_1, i_2, i_3, x) di_1 \right]^2}{\partial i_3 \partial x} + \frac{\left[\int_0^{i_2} \Psi_B(i_1, i_2, i_3, x) di_2 \right]^2}{\partial i_3 \partial x}. \end{aligned}$$

При выборе типа аппроксимирующих функции преследовались следующие задачи:

- функция должна иметь вид, позволяющий аналитически определять первые и вторые частные производные по всем координатам;
- функция и ее производные по перемещению ротора в начале и конце интервала, на котором производится аппроксимация (полное деление ВИМ), должны быть одинаковыми;
- зависимость предлагаемой функции должна учитывать изменения токов не только собственной, но и соседних фаз.

Учитывая вышесказанное, предложено: общий вид полиномов, которые описывают функции потокосцеплений фаз А, В и С, используем следующего вида:

$$\begin{aligned} \Psi_A(i_1, i_2, i_3, x) &= w \sum_{l=1}^m \left[\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n aa_{ijk} \cdot i_1^i \cdot i_2^j \cdot i_3^k \right] \times \\ &\times \cos(\omega l x) + \left[\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n ab_{ijk} \cdot i_1^i \cdot i_2^j \cdot i_3^k \right] \sin(\omega l x) + w \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n ac_{ijk} \cdot i_1^i \cdot i_2^j \cdot i_3^k; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Psi_B(i_1, i_2, i_3, x) &= w \sum_{l=1}^m \left[\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n ba_{ijk} \cdot i_1^i \cdot i_2^j \cdot i_3^k \right] \times \\ &\times \cos(\omega l x) + \left[\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n bb_{ijk} \cdot i_1^i \cdot i_2^j \cdot i_3^k \right] \sin(\omega l x) + w \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n bc_{ijk} \cdot i_1^i \cdot i_2^j \cdot i_3^k; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \Psi_C(i_1, i_2, i_3, x) &= w \sum_{l=1}^m \left[\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n ca_{ijk} \cdot i_1^i \cdot i_2^j \cdot i_3^k \right] \times \\ &\times \cos(\omega l x) + \left[\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n cb_{ijk} \cdot i_1^i \cdot i_2^j \cdot i_3^k \right] \sin(\omega l x) + w \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n cc_{ijk} \cdot i_1^i \cdot i_2^j \cdot i_3^k, \end{aligned}$$

где aa_{ijk} , ab_{ijk} , ac_{ijk} , ba_{ijk} , bb_{ijk} , bc_{ijk} , ca_{ijk} , cb_{ijk} , cc_{ijk} – коэффициенты полиномов для фаз А, В и С соответственно, определенные с использованием полиномов Чебышева на множестве равноудаленных точек; w – количество витков обмотки одной фазы; ω – угловая частота первой гармоники потока; l – номер гармоники.

Полином, описывающий электромагнитную силу ЭМП-амортизатора, имеет вид:

$$\begin{aligned} F_e(i_1, i_2, i_3, x) &= \sum_{l=1}^m \left[\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n ma_{ijk} \cdot i_1^i \cdot i_2^j \cdot i_3^k \right] \times \\ &\times \cos(\omega l x) + \left[\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n mb_{ijk} \cdot i_1^i \cdot i_2^j \cdot i_3^k \right] \sin(\omega l x) + \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n mc_{ijk} \cdot i_1^i \cdot i_2^j \cdot i_3^k, \end{aligned} \quad (3)$$

где ma_{ijk} , mb_{ijk} , mc_{ijk} – коэффициенты полинома, определенные по методу Чебышева.

Стандартные алгоритмы аппроксимации полиномами Чебышева используют нормализованную шкалу ординат, поэтому для приведения реальных токов к нормализованным, введены масштабные коэффициенты и смещения M и Z . В результате получим для фаз А (записи уравнений для фаз В и С аналогичны):

$$\begin{aligned} \Psi_A(i_1, i_2, i_3, x) &= w \sum_{l=1}^m \left[\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n aa_{ijk} (i_1 M + Z)^i (i_2 M + Z)^j (i_3 M + Z)^k \right] \times \\ &\times \cos(\omega l x) + \left[\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n ab_{ijk} (i_1 M + Z)^i (i_2 M + Z)^j (i_3 M + Z)^k \right] \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} &\times \sin(\omega l x) + w \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n ac_{ijk} (i_1 M + Z)^i (i_2 M + Z)^j (i_3 M + Z)^k; \\ F_e(i_1, i_2, i_3, x) &= \sum_{l=1}^m \left[\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n ma_{ijk} (i_1 M + Z)^i (i_2 M + Z)^j (i_3 M + Z)^k \right] \times \\ &\times \cos(\omega l x) + \left[\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n mb_{ijk} (i_1 M + Z)^i (i_2 M + Z)^j (i_3 M + Z)^k \right] \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} &\times \sin(\omega l x) + \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n mc_{ijk} (i_1 M + Z)^i (i_2 M + Z)^j (i_3 M + Z)^k. \end{aligned}$$

Для определения коэффициентов аппроксимирующего полинома предлагается использовать метод на основе полиномов Чебышева на множестве равноудаленных точек [4, 6].

В уравнениях системы (1) необходимо интегрировать и дифференцировать функции потокосцепления (полином (4)) по токам фаз и перемещению ротора. Используемая для аппроксимации регрессионная модель позволяет проводить аналитические дифференцирования и интегрирования потокосцеплений как по токам, так и по перемещению. При этом все производные и значения аппроксимирующей функции в начале и конце периода одинаковы. Для всех возможных вариантов частных производных, входящих в математическую модель (1), получаем следующие выражения:

$$\frac{\partial \left[\int_0^{i_1} \Psi_A(i_1, i_2, i_3, x) di_1 \right]}{\partial i_2 \partial i_3} =$$

$$= w \sum_{l=1}^m \left[\sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n M \cdot aa_{ijk} \frac{j \cdot k}{i+1} (i_1 M + Z)^{i+1} (i_2 M + Z)^{j-1} (i_3 M + Z)^{k-1} \right] \cos(\omega l x) +$$

$$+ \left(\sum_{i=0(1,1)}^n \sum_{j=1(0,1)}^n \sum_{k=1(1,0)}^n M \cdot aa_{ijk} \frac{j \cdot k}{i+1} (i_1 M + Z)^{i+1} + (i_2 M + Z)^{j-1} (i_3 M + Z)^{k-1} \right) \sin(\omega l x) \Bigg]$$

$$+ w \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n M \cdot aa_{ijk} \frac{i \cdot k}{i+1} (i_1 M + Z)^{i+1} (i_2 M + Z)^{j-1} (i_3 M + Z)^{k-1};$$

$$\frac{\partial \left[\int_0^{i_1} \Psi_A(i_1, i_2, i_3, x) di_1 \right]}{\partial^2 i_2} =$$

$$= w \sum_{l=1}^m \left[\sum_{i=0}^n \sum_{j=2k=0}^n \sum_{k=0}^n M \cdot aa_{ijk} \frac{j(j-1)}{i+1} (i_1 M + Z)^{i+1} (i_2 M + Z)^{j-1} (i_3 M + Z)^k \right] \cos(\omega l x) +$$

$$+ \left(\sum_{i=0}^n \sum_{j=2k=0}^n \sum_{k=0}^n M \cdot aa_{ijk} \frac{j(j-1)}{i+1} (i_1 M + Z)^{i+1} + (i_2 M + Z)^{j-2} (i_3 M + Z)^k \right) \sin(\omega l x) \Bigg]$$

$$+ w \sum_{i=0}^n \sum_{j=2k=0}^n \sum_{k=0}^n M \cdot aa_{ijk} \frac{j(j-1)}{i+1} (i_1 M + Z)^{i+1} (i_2 M + Z)^{j-2} (i_3 M + Z)^k;$$

$$\frac{\partial \left[\int_0^{i_1} \Psi_A(i_1, i_2, i_3, x) di_1 \right]}{\partial^2 i_3} =$$

$$= w \sum_{l=1}^m \left[\sum_{i=0}^n \sum_{j=0k=2}^n \sum_{k=2}^n M \cdot aa_{ijk} \frac{k(k-1)}{i+1} (i_1 M + Z)^{i+1} (i_2 M + Z)^j (i_3 M + Z)^{k-2} \right] \cos(\omega l x) +$$

$$+ \left(\sum_{i=0}^n \sum_{j=0k=2}^n \sum_{k=2}^n M \cdot aa_{ijk} \frac{k(k-1)}{i+1} (i_1 M + Z)^{i+1} (i_2 M + Z)^j (i_3 M + Z)^{k-2} \right) \sin(\omega l x) \Bigg]$$

$$+ w \sum_{i=0}^n \sum_{j=0k=2}^n \sum_{k=2}^n M \cdot aa_{ijk} \frac{k(k-1)}{i+1} (i_1 M + Z)^{i+1} (i_2 M + Z)^j (i_3 M + Z)^{k-2};$$

$$\frac{\partial \Psi_A}{\partial i_1} = w \sum_{l=1}^m \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=0k=0}^n \sum_{k=0}^n \left(M \cdot aa_{ijk} i (i_1 M + Z)^{i-1} (i_2 M + Z)^j (i_3 M + Z)^k \right) \cos(\omega l x) + \right.$$

$$+ \sum_{i=1}^n \sum_{j=0k=0}^n \sum_{k=0}^n \left(M \cdot aa_{ijk} i (i_1 M + Z)^{i-1} (i_2 M + Z)^j (i_3 M + Z)^k \right) \sin(\omega l x) \Bigg] +$$

$$+ w \sum_{i=1}^n \sum_{j=0k=0}^n \sum_{k=0}^n \left(M \cdot aa_{ijk} i (i_1 M + Z)^{i-1} (i_2 M + Z)^j (i_3 M + Z)^k \right);$$

$$\frac{\partial \Psi_A}{\partial i_2} = w \sum_{l=1}^m \left[\sum_{i=0}^n \sum_{j=1k=0}^n \sum_{k=0}^n \left(M \cdot aa_{ijk} j (i_1 M + Z)^i (i_2 M + Z)^{j-1} (i_3 M + Z)^k \right) \cos(\omega l x) + \right.$$

$$+ \sum_{i=0}^n \sum_{j=1k=0}^n \sum_{k=0}^n \left(M \cdot aa_{ijk} j (i_1 M + Z)^i (i_2 M + Z)^{j-1} (i_3 M + Z)^k \right) \sin(\omega l x) \Bigg] +$$

$$+ w \sum_{i=0}^n \sum_{j=1k=0}^n \sum_{k=0}^n \left(M \cdot aa_{ijk} j (i_1 M + Z)^i (i_2 M + Z)^{j-1} (i_3 M + Z)^k \right);$$

$$\frac{\partial \Psi_A}{\partial i_3} = w \sum_{l=1}^m \left[\sum_{i=0}^n \sum_{j=0k=1}^n \sum_{k=1}^n \left(M \cdot aa_{ijk} k (i_1 M + Z)^i (i_2 M + Z)^j (i_3 M + Z)^{k-1} \right) \cos(\omega l x) + \right.$$

$$+ \sum_{i=0}^n \sum_{j=0k=1}^n \sum_{k=1}^n \left(M \cdot aa_{ijk} k (i_1 M + Z)^i (i_2 M + Z)^j (i_3 M + Z)^{k-1} \right) \sin(\omega l x) \Bigg] +$$

$$+ w \sum_{i=0}^n \sum_{j=0k=1}^n \sum_{k=1}^n \left(M \cdot aa_{ijk} k (i_1 M + Z)^i (i_2 M + Z)^j (i_3 M + Z)^{k-1} \right);$$

$$\frac{\partial \left[\int_0^{i_1} \Psi_A(i_1, i_2, i_3, x) di_1 \right]}{\partial i_2 \partial x} =$$

$$= w \sum_{l=1}^m \left[-\omega l \cdot \sum_{i=0}^n \sum_{j=1k=0}^n \sum_{k=0}^n \left(aa_{ijk} \frac{j}{i+1} (i_1 M + Z)^{i+1} (i_2 M + Z)^{j-1} (i_3 M + Z)^k \right) \sin(\omega l x) + \right.$$

$$+ \omega l \cdot \sum_{i=0}^n \sum_{j=1k=0}^n \sum_{k=0}^n \left(aa_{ijk} \frac{j}{i+1} (i_1 M + Z)^{i+1} (i_2 M + Z)^{j-1} (i_3 M + Z)^k \right) \cos(\omega l x) \Bigg];$$

$$\frac{\partial \left[\int_0^{i_1} \Psi_A(i_1, i_2, i_3, x) di_1 \right]}{\partial i_3 \partial x} =$$

$$= w \sum_{l=1}^m \left[-\omega l \cdot \sum_{i=0}^n \sum_{j=0k=1}^n \sum_{k=1}^n \left(aa_{ijk} \frac{k}{i+1} (i_1 M + Z)^{i+1} (i_2 M + Z)^j (i_3 M + Z)^{k-1} \right) \sin(\omega l x) + \right.$$

$$+ \omega l \cdot \sum_{i=0}^n \sum_{j=0k=1}^n \sum_{k=1}^n \left(aa_{ijk} \frac{k}{i+1} (i_1 M + Z)^{i+1} (i_2 M + Z)^j (i_3 M + Z)^{k-1} \right) \cos(\omega l x) \Bigg]$$

$$\frac{\partial \Psi_A}{\partial x} = w \sum_{l=1}^m \left[-\omega l \cdot \sum_{i=0}^n \sum_{j=1k=0}^n \sum_{k=0}^n \left(aa_{ijk} (i_1 M + Z)^i (i_2 M + Z)^j (i_3 M + Z)^k \right) \sin(\omega l x) + \right.$$

$$+ \omega l \cdot \sum_{i=0}^n \sum_{j=1k=0}^n \sum_{k=0}^n \left(aa_{ijk} (i_1 M + Z)^i (i_2 M + Z)^j (i_3 M + Z)^k \right) \cos(\omega l x) \Bigg];$$

$$\frac{\partial \left[\int_0^{i_1(B,C)} \Psi_A(i_1, i_2, i_3, x) di_1 \right]}{\partial i_2 \partial i_3} = \sum_{l=1}^m \left[\sum_{i=0}^n \sum_{j=1k=1}^n \sum_{k=1}^n M \cdot aa_{ijk} \frac{j \cdot k}{i+1} (i_1 M + Z)^{i+1} \times \right.$$

$$\times (i_2 M + Z)^{j-1} (i_3 M + Z)^{k-1} \Bigg] \cos(\omega l x) + \left(\sum_{i=0}^n \sum_{j=1k=1}^n \sum_{k=1}^n M \cdot aa_{ijk} \frac{j \cdot k}{i+1} (i_1 M + Z)^{i+1} \times \right.$$

$$\times (i_2 M + Z)^{j-1} (i_3 M + Z)^{k-1} \Bigg) \sin(\omega l x) \Bigg] + \sum_{i=0}^n \sum_{j=1k=1}^n \sum_{k=1}^n M \cdot aa_{ijk} \frac{j \cdot k}{i+1} \times$$

$$(i_1 M + Z)^{i+1} (i_2 M + Z)^{j-1} (i_3 M + Z)^{k-1};$$

$$\frac{\partial \Psi_A}{\partial i_1} = \sum_{l=1}^m \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=0k=0}^n \sum_{k=0}^n M \cdot aa_{ijk} \cdot i \cdot (i_1 M + Z)^{i-1} \times (i_2 M + Z)^{j-0} (i_3 M + Z)^{k-0} \right] \cos(\omega l x) +$$

$$+ \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=0k=0}^n \sum_{k=0}^n M \cdot aa_{ijk} \cdot i \cdot (i_1 M + Z)^{i-1} \times (i_2 M + Z)^{j-0} (i_3 M + Z)^{k-0} \right) \sin(\omega l x) \Bigg] +$$

$$+ \sum_{i=1}^n \sum_{j=0k=0}^n \sum_{k=0}^n M \cdot aa_{ijk} \cdot i \cdot (i_1 M + Z)^{i-1} (i_2 M + Z)^{j-0} (i_3 M + Z)^{k-0};$$

$$\frac{\partial \left[\int_0^{i_1(B,C)} \Psi_A(i_1, i_2, i_3, x) di_1 \right]}{\partial i_2 \partial \gamma} = \sum_{l=1}^m \left[-\omega l \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=0k=0}^n \sum_{k=0}^n aa_{ijk} \frac{j}{i+1} (i_1 M + Z)^{i+1} \times \right. \right.$$

$$\times (i_2 M + Z)^{j-1} (i_3 M + Z)^{k-0} \Bigg) \sin(\omega l x) + \omega l \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=0k=0}^n \sum_{k=0}^n M \cdot aa_{ijk} \frac{j}{i+1} (i_1 M + Z)^{i+1} \times \right.$$

$$\times (i_2 M + Z)^{j-1} (i_3 M + Z)^{k-0} \Bigg) \cos(\omega l x) \Bigg]$$

Для определения порядка регрессионной модели, описывающей цифровой эксперимент, предлагается оценить результаты аппроксимации и сравнить их с результатами эксперимента по критерию минимума максимального отклонения. На рис. 1, 2 приведены результаты расчета максимального отклонения аппроксимирующих полиномов для потокосцеплений фаз и электромагнитной силы ЭМП.

Для определения рационального значения степени аппроксимирующих полиномов проведен комплекс цифровых экспериментов, в ходе которых были установлены величины максимального отклонения полученных полиномиальных зависимостей.

Анализ результатов расчета показал следующее, что для обеспечения максимального отклонения в пределах 3-4 % достаточно использовать полиномы 3 степени по току соответствующей фазы ($n = 3$), при числе гармоник $m = 3$. Результаты сопоставления расчетных значений по модели и вычисленных с помощью полинома Чебышева представлены на рис. 1.

Зависимость изменения Ψ представлена от перемещения x ротора, при токах в фазах (-560А, -420 А, -420А) и при токах в фазах (560А, 420 А, 420А).

Величина среднеквадратического отклонения не превышает 2 % (1,61 %).

Описание полиномом изменения силы F_e ЭМП-амортизатора при принятых параметрах [2] показало, что для обеспечения минимума максимального отклонения менее 4-5 % необходимо степени полинома $n = 3$, а число гармоник $m = 27$. Фрагмент сопоставляемых результатов приведен на рис. 2.

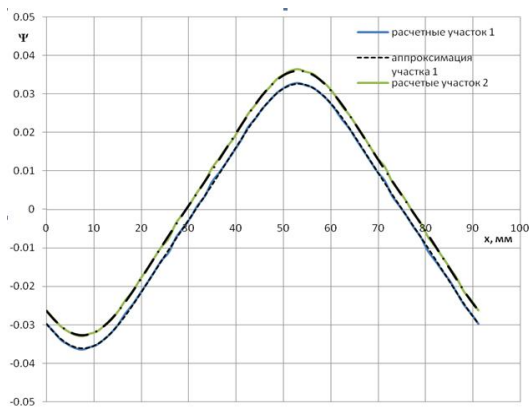


Рис. 1. Результаты расчета и аппроксимации потокоцепления в зависимости от перемещения ротора: нижние кривые (при токах -560 A , -420 A , -420 A); верхние кривые (при токах 560 A , 420 A , 420 A)

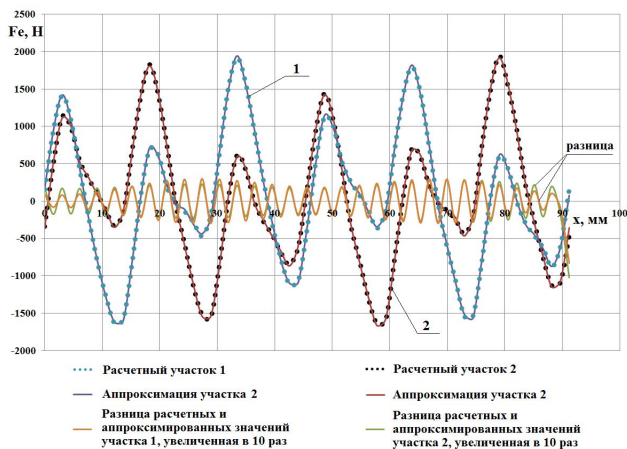


Рис. 2. Результаты расчета и аппроксимации силы F_e ЭМП в зависимости от перемещения ротора: нижние кривые в начальный момент (при токах -560 A , -420 A , -420 A); верхние кривые в начальный момент (при токах 560 A , 420 A , 420 A)

ВЫВОДЫ

Предложена структура аппроксимирующего полинома, позволяющего получить непрерывные зависимости для идентификации параметров математической модели электроамортизатора.

Определены параметры аналитических зависимостей потокоцеплений и электромагнитной силы математической модели электроамортизатора, приведенной в работе [2].

Выбраны рациональные значения степеней и число гармоник аппроксимирующих полиномов по критерию минимального отклонения, полученных по результатам цифрового моделирования ЭМП-амортизатора. Установлено, что степень полинома как для потокоцеплений, так и для электромагнитной силы достаточно $n = 3$, а число гармоник для потокоцеплений фаз достаточно $m = 3$, для электромагнитной силы $m = 27$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сергиенко А.Н. Анализ конструкций электромеханических преобразователей и выбор схемы электроамортизатора неподдресоренных масс транспортного средства / А.Н. Сергиенко, Б.Г. Любарский, Н.Е. Сергиенко и др. // Авто-

мобильный транспорт. – Харьков: Изд-во ХНАДУ / Сб. науч. тр. – 2012. – Вып. 31.

2. Сергиенко А.Н. Математическая модель электромеханического преобразователя для электроамортизатора транспортного средства / А.Н. Сергиенко, Б.Г. Любарский, Н.Е. Сергиенко // Электротехника і електромеханіка. – 2012. – № 6. – С. 61-65.

3. Режим доступа: <http://femm.berlios.de>.

4. Де Бор К. Практическое руководство по сплайнам: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1985. – 304 с.

5. Сергиенко А. Н. Оценка показателей электро-амортизатора неподдресоренных масс транспортного средства / Вісник НТУ "ХПІ". Зб. наук. праць. Серія: Автомобіле- та тракторобудування. – №60 (966). – 2012. – С. 120-126.

6. Данилов Ю.А. Многочлены Чебышева. – Мн.: Выш. шк., 1984. – 157 с.

Bibliography (transliterated): 1. Sergienko A.N. Analiz konstrukcij `elektromehaničeskix preobrazovatelej i vybor shemy `elektroamortizatora nepodressorenyh mass transportnogo sredstva / A.N. Sergienko, B.G. Lyubarskij, N.E. Sergienko i dr. // Avtomobil'nyj transport. - Har'kov: Izd-vo HNADU / Sb. nauch. tr. - 2012. - Vyp. 31. 2. Sergienko A.N. Matematičeskaja model' `elektromehaničeskogo preobrazovatelya dlya `elektroamortizatora transportnogo sredstva / A.N. Sergienko, B.G. Lyubarskij, N.E. Sergienko // Elektrotehnika i elektromehaničeska. - 2012. - № 6. - S. 61-65. 3. Rezhim dostupa: <http://femm.berlios.de>. 4. De Bor K. Praktičeskoe rukovodstvo po splajnam: Per. s angl. - M.: Radio i svyaz', 1985. - 304 s. 5. Sergienko A. N. Ocenka pokazatelej `elektro-amortizatora nepodressorenyh mass transportnogo sredstva / Visnik NTU "HPI". Zb. nauk. prac'. Seriya: Avtomobile- ta traktorobuduvannya. - №60 (966). - 2012. - S. 120-126. 6. Danilov Ju.A. Mnogochleny Chebysheva. - Mn.: Vysh. shk., 1984. - 157 s.

Поступила 09.02.2013

Сергиенко Антон Николаевич

кафедра "Теория и системы автоматизированного проектирования механизмов и машин"

Национальный технический университет

"Харьковский политехнический институт"

61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21

тел. (057) 7076901, e-mail: antonsergienkomax@rambler.ru

Любарский Борис Григорьевич, к.т.н., доц.

кафедра "Электрического транспорта и тепловозостроения"

Национальный технический университет

"Харьковский политехнический институт"

61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21

тел. (057) 7076367, e-mail: lboris19111972@mail.ru

Сергиенко Николай Егорович, к.т.н., доц.

кафедра "Автомобиле- и тракторостроения"

Национальный технический университет

"Харьковский политехнический институт"

61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21

тел. (057) 7076066, e-mail: ne_sergienko@rambler.ru

Sergienko A.N., Ljubarskiyi B.G., Sergienko N.E.

Approximation of an electric shock absorber mathematical model parameters.

The paper introduces a procedure of approximating polynomial calculation to allow identifying magnetic linkage and electromagnetic force of an electric shock absorber mathematical model.

Key words – electric shock absorber, mathematical model, approximation, Chebyshev polynomials, power, magnetic linkage.