

МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ДЕМПФИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ С ДВОЙНЫМ РОТОРОМ

Р.Р. Саттаров, Ф.Р. Исмагилов, М.Б. Гумерова
г. Уфа, УГАЭС

MECHANICAL CHARACTERISTICS OF ELECTROMAGNETIC DAMPING ELEMENTS WITH DOUBLE ROTOR

R.R. Sattarov, F.R. Ismagilov, M.B. Gumerova
Ufa, Ufa State Aviation Technical University

Получены выражения для определения электромагнитного момента демпфирующих элементов с двойным ротором, с учетом и без учета взаимного влияния магнитных полей роторов.

Ключевые слова: демпфирующий элемент, двойной ротор, электромагнитный момент.

The expressions to determine electromagnetic torque of damping elements with double rotor, with and without mutual influence of magnetic fields of rotors are obtained.

Keywords: damping element, double rotor, electromagnetic torque.

Электромагнитные демпфирующие элементы (ЭДЭ), вторичная среда которых выполнена в виде двойного ротора, отличаются высокой эффективностью, широким диапазоном рабочих скоростей и широкими возможностями управления процессом торможения благодаря специальной механической характеристике.

Интересным представляется рассмотрение задачи исследования механических характеристик двухроторных ЭДЭ (ДЭДЭ) в установившемся режиме. При проектировании ЭДЭ для амортизационных систем исходя из статических механических характеристик стремятся получить максимальный электромагнитный момент при заданной скорости вращения и выбранных габаритах демпфера, а для демпферов, используемых в качестве нагрузочных элементов автоматизированных испытательных стендов, установившийся режим является основным.

В [1] получены механические характеристики для ДЭДЭ при встречном движении роторов, что на практике трудно реализуемо. В данной статье разрабатывается математическая модель, с использованием уравнений электромагнитного поля, позволяющая получать механические характеристики ДЭДЭ, роторы которого движутся согласованно. При построении модели использованы общепринятые при теоретическом исследовании ЭДЭ допущения [7].

На рис. 1 представлен эскиз ДЭДЭ, с полыми цилиндрическими роторами из немагнитных про-

водящих материалов. В такой конструкции отсутствует продольный краевой эффект, поперечный краевой эффект может быть учтен введением поправочного коэффициента [6].

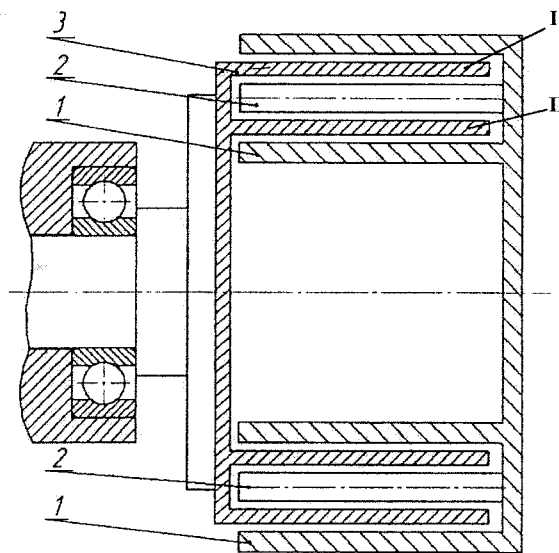


Рис. 1. Эскиз электромагнитного демпфирующего элемента с двойным ротором: 1 – статор; 2 – индуктор с постоянными магнитами; 3 – двойной полый ротор

При таком конструктивном исполнении электромагнитный момент ДЭДЭ можно определить как сумму моментов от каждого ротора

$$M = M_1 + M_2, \quad (1)$$

где M_1 и M_2 – моменты, создаваемые внешним (I) и внутренним (II) роторами.

Электромагнитный момент может быть определен отдельно для каждого ротора через результирующую индукцию магнитного поля и плотность тока, наводимого в соответствующем роторе [2–5].

В рассматриваемом ЭДЭ (см. рис. 1) скорость имеет одну составляющую по оси x $V_x = V$; $V_y = 0$; $V_z = 0$. При принятых допущениях векторы индукции и напряженности магнитного поля имеют только составляющую по оси z : $B_z = B$; $H_z = H$, а плотности вихревых токов будут иметь одну составляющую δ_{1y} и δ_{2y} . Так как напряженность первичного магнитного поля изменяется по гармоническому закону вдоль оси x , то комплексные амплитуды векторов напряженностей вторичных магнитных полей в установившемся режиме также будут изменяться по гармоническому закону [2–5]. Тогда выражения для моментов можно записать в комплексной форме

$$M_1 = \frac{D_1}{4} \operatorname{Re} \int_0^{\pi D_1} \int_0^{2a} \int_0^{\Delta_1} \delta_{1y} \tilde{B} dx dy dz; \\ M_2 = \frac{D_2}{4} \operatorname{Re} \int_0^{\pi D_2} \int_0^{2a} \int_0^{\Delta_2} \delta_{2y} \tilde{B} dx dy dz, \quad (2)$$

где $\tilde{B}$ – сопряженное значение результирующей индукции магнитного поля; Δ_1 , Δ_2 – толщина полого I и II ротора соответственно; $2a$ – ширина магнитной системы; D_1 и D_2 – средние диаметры первого и второго роторов соответственно.

Целесообразно представить выражения для электромагнитных моментов I и II роторов в следующем виде:

$$M_1 = M_B \cdot m_1; \\ M_2 = M_B \cdot m_2, \quad (3)$$

где M_B – базовая величина электродинамического момента; m_1 , m_2 – относительный электродинамический момент в I и II зоне.

В качестве базовой величины принимается максимальный электромагнитный момент первого ротора

$$M_B = p \frac{B_{0m}^2 \pi D_1 \cdot 2a \cdot \Delta_1}{4 \mu_0 K_{d1}}, \quad (4)$$

где B_{0m} – амплитуда индукции первичного магнитного поля; μ_0 – магнитная проницаемость.

Учитывая то, что поле постоянных магнитов является безвихревым $\operatorname{rot} \vec{E} = 0$, а индукции и напряженности связаны соотношением:

$$\dot{B}_1 = \mu_0 K_{d1} \dot{H}_1; \\ \dot{B}_2 = \mu_0 K_{d2} \dot{H}_2, \quad (5)$$

где K_{d1} , K_{d2} – коэффициенты приведения для зон I и II [1–4], результирующее магнитное поле можно представить в виде суммы первичного и вторичных полей

$$\dot{H} = \dot{H}_0 + \dot{H}_1 + \dot{H}_2; \\ \dot{B} = \dot{B}_0 + \dot{B}_1 + \dot{B}_2, \quad (6)$$

где $\dot{H}$, $\dot{B}$ – напряженность и индукция результирующего магнитного поля; $\dot{H}_0$, $\dot{B}_0$ – напряженность и индукция первичного электромагнитного поля; $\dot{H}_1$, $\dot{B}_1$ – напряженность и индукция вторичного электромагнитного поля, создаваемого токами I ротора; $\dot{H}_2$, $\dot{B}_2$ – напряженность и индукция вторичного электромагнитного поля, создаваемого токами II ротора.

На основе уравнений Максвелла в одномерном приближении можно получить следующие уравнения для определения напряженностей вторичных магнитных полей

$$\dot{H}_1 = -j \varepsilon_1 \left(\dot{H}_1 + \dot{H}_2 \frac{K_{d2}}{K_{d1}} + \frac{\dot{B}_0}{\mu_0 K_{d1}} \right); \\ \dot{H}_2 = -j \varepsilon_2 \left(\dot{H}_1 \frac{K_{d1}}{K_{d2}} + \dot{H}_2 + \frac{\dot{B}_0}{\mu_0 K_{d2}} \right), \quad (7)$$

где $\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1 V_1 \mu_0 K_{d1}}{\alpha_1} \cdot K_{\sigma 1}$; $\varepsilon_2 = \frac{\sigma_2 V_2 \mu_0 K_{d2}}{\alpha_2} \cdot K_{\sigma 2}$ –

безразмерные частоты, характеризующие интенсивность электромагнитных процессов (магнитное число Рейнольдса) в зонах I, II; $K_{\sigma 1}$, $K_{\sigma 2}$ – коэффициенты уменьшения электрической проводимости, учитывающие проявление поперечного краевого эффекта по [6]; $\alpha_1 = \frac{\pi}{\tau_1}$; $\alpha_2 = \frac{\pi}{\tau_2}$; τ_1 , τ_2 –

полюсные деления для I и II зон.

Решение (7) дает выражения для напряженностей магнитного поля

$$\dot{H}_1 = - \frac{B_0 \varepsilon_1 (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}{\mu_0 K_{d1} [1 + (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)^2]} - j \frac{B_0 \varepsilon_1}{\mu_0 K_{d1} [1 + (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)^2]}; \\ \dot{H}_2 = - \frac{B_0 \varepsilon_2 (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}{\mu_0 \cdot K_{d2} [1 + (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)^2]} - j \frac{B_0 \varepsilon_2}{\mu_0 \cdot K_{d2} [1 + (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)^2]}. \quad (8)$$

Плотности вихревых токов

$$\delta_{1y} = - \frac{\partial \dot{H}_1}{\partial x} = j \alpha_1 \dot{H}_1; \\ \delta_{2y} = - \frac{\partial \dot{H}_2}{\partial x} = j \alpha_2 \dot{H}_2. \quad (9)$$

Результирующие индукции магнитных полей обеих зон равны и определяются следующим образом:

$$\dot{B}_p = \frac{\dot{B}_0}{1 + (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)^2} + j \frac{\dot{B}_0 (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}{1 + (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)^2}. \quad (10)$$

Тогда используя (2) с учетом (3) и (4), относительные электромагнитные моменты определяются по выражениям:

$$m_1 = \frac{2\varepsilon_1}{1 + (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)^2};$$

$$m_2 = \frac{K_d^*}{K_\Delta K_\tau} \cdot \frac{2\varepsilon_2}{1 + (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)^2}, \quad (11)$$

где $K_d^* = \frac{K_{d1}}{K_{d2}}$; $K_\Delta = \frac{\Delta_1}{\Delta_2}$; $K_\tau = \frac{\tau_1}{\tau_2} = \frac{\alpha_2}{\alpha_1}$.

Линейные скорости роторов в I и II зоне V_1 и V_2 прямо пропорциональны угловой частоте вращения ω . Это также справедливо и для безразмерных величин ε_1 и ε_2 , что позволяет установить неразрывную связь между ними, которая может быть записана в виде

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{\sigma^* \cdot K_d^* \cdot K_\sigma^* \cdot K_\tau^2} \varepsilon_1, \quad (12)$$

где $\sigma^* = \frac{\sigma_1}{\sigma_2}$; $K_\sigma^* = \frac{K_{\sigma 1}}{K_{\sigma 2}}$.

Выражения (12) позволяют исследовать влияние электромагнитных процессов в одном роторе на аналогичные в другом. Это влияние оказывается размагничивающим. При увеличении ε_2 от 0 до 4 максимум относительного момента первого ротора снижается с 1 до 0,1 (в десять раз). Одновременно происходит смещение критического числа Рейнольдса ε_{1K} , при котором m_1 достигает максимума, в сторону больших значений (с 1 при $\varepsilon_2 = 0$ до 4,1 при $\varepsilon_2 = 4$). Влияние реакции вихревых токов, наводимых в первом роторе на электромагнитные процессы во втором роторе также оказывается размагничивающим.

Для относительного суммарного электродинамического момента с учетом (12) получают следующее выражение:

$$m = \left(1 + \frac{1}{K_\Delta \cdot \sigma^* \cdot K_\sigma^* \cdot K_\tau^3} \right) \times$$

$$\times \frac{2\varepsilon_1}{1 + \varepsilon_1^2 \left(1 + \frac{1}{\sigma^* \cdot K_d^* \cdot K_\sigma^* \cdot K_\tau^2} \right)^2}. \quad (13)$$

Приравняв нулю частную производную $\frac{\partial m}{\partial \varepsilon_1}$,

можно определить максимальный электродинамический момент и его положение на механической характеристике, характеризуемое критическим ε_{1K} .

$$\varepsilon_{1K} = \frac{\sigma^* \cdot K_d^* \cdot K_\sigma^* \cdot K_\tau^2}{1 + \sigma^* \cdot K_d^* \cdot K_\sigma^* \cdot K_\tau^2}. \quad (14)$$

Как видно из этого выражения, критическое значение ε_{1K} зависит от соотношения электриче-

ских проводимостей роторов, физических свойств материалов магнитопровода, а также геометрии магнитной системы. Максимальное значение суммарного момента запишется в виде

$$m_{\max} = \left(1 + \frac{1}{K_\Delta \cdot \sigma^* \cdot K_\sigma^* \cdot K_\tau^3} \right) \times$$

$$\times \frac{2\varepsilon_{1K}}{1 + \varepsilon_{1K}^2 \left(1 + \frac{1}{\sigma^* \cdot K_d^* \cdot K_\sigma^* \cdot K_\tau^2} \right)^2}. \quad (15)$$

Таким образом, увеличение σ^* приводит к увеличению максимального момента при одновременном уменьшении ε_{1K} , что подтверждается зависимостями $m_1 = f(\varepsilon_1)$, $m_2 = f(\varepsilon_1)$, для $\sigma^* = 2$, $\sigma^* = 0,5$ рассчитанными по формулам (11) и (13) и представленными на рис. 2. Физически возрастание максимума относительного момента объясняется тем, что при увеличении σ_2 при постоянном σ_1 уменьшается размагничивающее влияние внутреннего ротора (II) на внешний ротор (I) и наоборот при увеличении σ_1 при постоянном σ_2 размагничивающее влияние внешнего ротора на внутренний ротор становится интенсивней.

Анализ выражений (11) и (13) показал, что при малых значениях σ^* момент создается в основном внутренним ротором; при $\sigma^* = \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2} \right) = \infty$ момент создается внешним ротором и $\varepsilon_{1K} = 1$; аналогично, при $\frac{\Delta_2}{\Delta_1} = 0$ $m = m_1$ $\varepsilon_{1K} = 1$, а при

$$\frac{\Delta_1}{\Delta_2} = 0 \quad m = m_2, \quad \varepsilon_{2K} = 1.$$

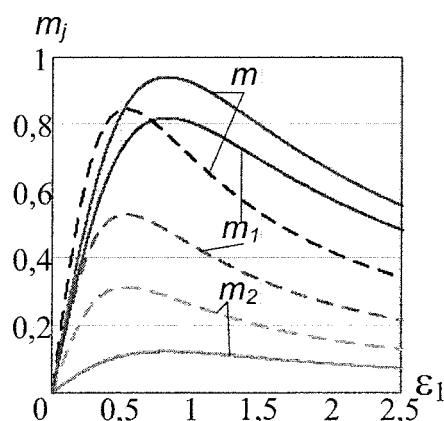


Рис. 2. Зависимости относительных моментов от ε_1 , при $\sigma^* = 0,5$ (пунктирная линия) и $\sigma^* = 2$ (сплошная

линия) для $K_{d1} = 1$, $K_\tau = \frac{D_1}{D_2} = 1,5$

Если принять, что $D_1/D_2 = 1$ задача сводится к решению задачи для ЭДЭ с одним ротором и также как в рассмотренных выше случаях хорошо согласуются с результатами, полученными для ЭДЭ с полым немагнитным ротором [7].

Таким образом, на основании полученных результатов, можно сделать вывод о том, что для исключения взаимного размагничивающего влияния роторов, необходимо обеспечить конструктивно раздельные, не влияющие друг на друга, пути магнитных потоков, пронизывающих роторы с различной проводимостью, или поэтапное включение в работу этих роторов при одном и том же магнитном потоке.

В этом случае электромагнитный момент, создаваемый каждым ротором, определяется по формулам:

– момент, создаваемый первым ротором:

$$M_1 = p \frac{B_0^2}{4\mu_0 K_{d1}} \pi D_1 \cdot 2a \cdot \Delta_1 \cdot \frac{2\varepsilon_1}{1+\varepsilon_1^2} = M_{\delta 1} \frac{2\varepsilon_1}{1+\varepsilon_1^2}. \quad (16)$$

– момент, создаваемый вторым ротором:

$$M_2 = p \frac{B_0^2}{4\mu_0 K_{d2}} \pi D_2 \cdot 2a \cdot \Delta_2 \cdot \frac{2\varepsilon_2}{1+\varepsilon_2^2} = M_{\delta 2} \frac{2\varepsilon_2}{1+\varepsilon_2^2}. \quad (17)$$

Суммарный момент:

$$M = M_{\delta} (m_1 + m_2) =$$

$$= p \frac{B_0^2}{4\mu_0 K_{d1}} \pi D_1 \cdot 2a \cdot \Delta_1 \cdot \left(\frac{2\varepsilon_1}{1+\varepsilon_1^2} + \frac{K_d^*}{K_r \cdot K_{\Delta}} \cdot \frac{2\varepsilon_2}{1+\varepsilon_2^2} \right). \quad (18)$$

С учетом (14) относительный суммарный момент:

$$m = m_1 + m_2 = \frac{2\varepsilon_1}{1+\varepsilon_1^2} + \frac{(K_d^*)^2 \cdot \sigma^* \cdot K_{\sigma}^* \cdot K_r}{K_{\Delta}} \times \\ \times \frac{2\varepsilon_1}{(\sigma^* K_d^* K_{\sigma}^* K_r^2)^2 + \varepsilon_1^2}. \quad (19)$$

На рис. 3 показаны графики зависимости суммарного момента от относительной скорости вращения при различных σ^* . Видно, что суммарный момент в этом случае получается больше, чем при взаимном влиянии вторичных полей. При равенстве электрических проводимостей роторов $\sigma^* = 1$, электромагнитный момент ЭДЭ с двойным ротором в полтора раза превышает электромагнитный момент, создаваемый однороторным ЭДЭ. При этом максимум кривой смещен в сторону больших частот (скоростей).

Произведенные расчеты показывают, что увеличение σ^* приводит к уменьшению максимума суммарного момента и к одновременному увеличению критической скорости, при которой достигается максимум. Это связано с тем, что уменьшение электрической проводимости второго ротора при неизменной электрической проводимости первого ротора приводит к уменьшению плотности

вихревых токов во втором роторе, а, следовательно, и к уменьшению создаваемого им электромагнитного момента.

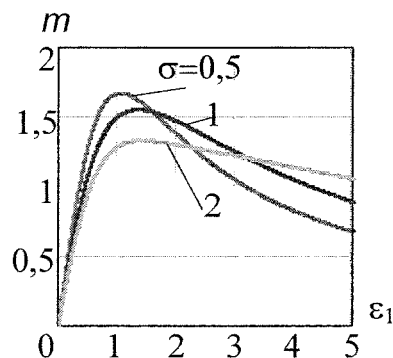


Рис. 3. Влияние σ^* на суммарный момент

Выводы

1. Получены выражения для определения электромагнитного момента двухроторного ЭДЭ для случая взаимного влияния вторичных полей и без него, позволяющие давать рекомендации по проектированию таких элементов.

2. Показано, что применение конструктивной схемы с двумя роторами, исключающей их взаимное размагничивающее влияние, целесообразно. Это приводит к существенному увеличению суммарного тормозного момента, создаваемого ДЭДЭ.

3. Максимум суммарного электромагнитного момента ДЭДЭ больше максимального момента демпфера с одним ротором примерно на 50 %. Максимальный момент сдвигается в сторону больших частот.

Литература

- Исмаилов, Ш.Г. Исследование выходных характеристик электромагнитных элементов автоматики с двойным ротором / Ш.Г. Исмаилов, И.Х. Хайруллин, И.Ф. Ганиев // *Электротехника*. — 1990. — №3. — С. 62–64.
- Саттаров, Р.Р. Общий метод расчета электромагнитных демпферов с распределенной вторичной системой сложной геометрии / Р.Р. Саттаров, Ф.Р. Исмаилов // *Электричество*. — № 5. — 2010. — С. 37–43.
- Исмаилов, Ф.Р. Электромеханические преобразователи для вибрационной техники / Ф.Р. Исмаилов, Р.Р. Саттаров. — М.: Машиностроение, 2008. — 276 с.
- Исмаилов, Ф.Р. Электромагнитные процессы в электромеханических демпфирующих элементах / Ф.Р. Исмаилов, Р.Р. Саттаров // *Электричество*, 2008. — № 10. — С. 46–52.
- Вольдек, А.И. Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом / А.И. Вольдек. — Л.: Энергия, 1970. — 272 с.

6. Хайруллин, И.Х. Электромагнитные переходные процессы в неявнополюсном магнитоэлектрическом тормозе с полым ротором / И.Х. Хайруллин // *Электричество*. – 1978. – № 10. – С. 85–87.

7. Электромеханические демпфирующие преобразователи с распределенными параметрами: учебное пособие // Р.Р. Саттаров и др.; ГОУ ВПО УГАТУ. – Уфа: УГАТУ, 2009. – 242 с.

Поступила в редакцию 12.06.2010 г.

Саттаров Роберт Радилович. Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электромеханика», Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа. Контактный телефон: 8(347) 273-77-87.

Robert R. Sattarov. The candidate of Technical Sciences, the Assistant Professor of the Department «Electromechanics» of Ufa State Aviation Technical University. Tel.: 8(347) 273-77-87.

Исмагилов Флюр Рашитович. Доктор технических наук, профессор, проректор, заведующий кафедрой «Электромеханика», Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа.

Flur R. Ismagilov. Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department «Electromechanics» of Ufa State Aviation Technical University.

Гумерова Марина Булатовна. Ассистент кафедры «Электромеханика», Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа. Контактный телефон: 8-937-300-29-36.

Marina B. Gumerova. The Assistant of the Department «Electromechanics» of Ufa State Aviation Technical University.