

Конструктивное решение цилиндрических центрирующих элементов магниторезонансного подвеса для снижения осевой силовой реакции

07, июль 2015

Корниенко А. Н.¹, Свинаярева М. С.^{1,*}

УДК: 621.31

¹Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

^{*}deadkeng@gmail.com

Проведенный обзор общих и специализированных публикаций [1,2] в спектре решаемой проблемы не выявил каких-либо конкретных материалов по данной тематике. В работе [3] рассмотрены некоторые вопросы проявления осевых тяжений между торцевыми областями ротора и магнитными потоками от обмоток статора в структуре электродвигателя. Эта информация оказалась полезной на промежуточной стадии решаемой задачи по снижению уровня аксиальных тяжений в паре ротор-статор ЦЭ МрП.

Прикладное исследование осевых силовых характеристик особого типа МрП с цилиндрическими ЦЭ является оригинальным даже в практике электромагнитного центрирования. Полученные результаты предназначаются для формирования однокомпонентного высокочувствительного акселерометра с пороговым значением в измерении ускорения менее $10^{-9}g$. ($g=9.8 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения)

Причиной возникновения силовой реакции в осевом канале МрП являются относительные смещения цилиндрических роторов из центрального расположения в расточках полюсов статоров ЦЭ. Решение задачи по снижению уровня центрирующих тяжений МрП представляется ослаблением взаимодействия магнитных потоков выпучивания от полюсных катушек статоров ЦЭ путем увеличения длины l цилиндрического ротора по отношению к толщине h пакета магнитопровода статора. Конструктивная схема МрП с цилиндрическими ЦЭ представлена на рис.1.

В соответствии с рис.1а МрП образован двумя ЦЭ в результате размещения в цилиндрическом корпусе четырехполюсных магнитопроводов статоров с расположенными на полюсах катушками схемы регулирования радиальным центрированием. Во внутреннюю расточку полюсов (рис.1б) с кольцевым воздушным зазором порядка нескольких десятком мкм помещаются цилиндрические роторы ЦЭ объединенные валиком (рис.1а). при надлежащем формировании резонансной структуры схемы управления каналов центрирования

МрП [2] роторы занимают некоторое бесконтактное положение относительно полюсов статором ЦЭ в соответствии с задаваемой жесткостью.

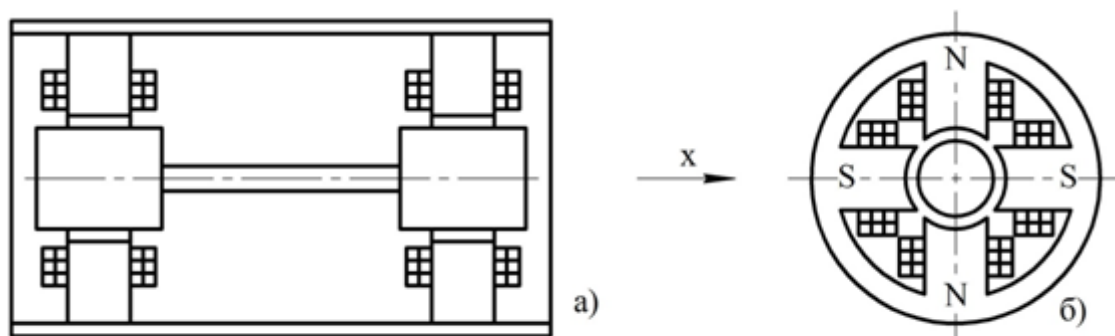


Рис.1. Конструктивная схема МрП (а) и цилиндрический ЦЭ (б).

Осевое положение системы роторов в расточках статоров МрП зависит от имеющей место проекции силы тяжести $mg \sin \alpha$ взвешиваемой массы при негоризонтальном расположении (угол отклонения $\alpha=0$) и силовой центрирующей функции, формируемой магнитными потоками выпучивания от полюсных катушек при наличии смещения по координате x . В процессе осевого центрирования роторов система регулирования МрП не принимает активного участия и может рассматриваться только в связи с достигаемым показателем жесткости радиального центрирования в качестве фактора проявления интенсивности торцевых магнитных тяжений. По этой причине в проводимом исследовании зависимости осевой силовой характеристики МрП от конструктивных параметров ЦЭ жесткость радиального центрирования детерминирована уровнем 1 г/мкм.

Выбор пути ослабления осевого центрирующего эффекта МрП конструктивными мерами продиктован возможностью удаления торцевых областей роторов ЦЭ из зоны интенсивного распределения магнитных потоков от полюсных катушек. С этой целью апробировалась партия роторов с увеличением длины l по отношению к толщине магнитопровода статора h с коэффициентом перекрытия k равным: 1.0; 1.5; 2.0; 2.5; 3.0 по формуле $l=kh$.

Определение осевой центрирующей силы F в функции смещения по координате x процедурой расчета характера распределения магнитных потоков выпучивания в зонах их взаимодействия с ферромагнитными роторами при различных величинах k в числовом виде оказалось малоэффективным. Поэтому предпочтение в исследовании осевых центрирующих свойств МрП было отдано экспериментальным оценкам.

В первой серии экспериментов, проведенных при горизонтально ориентированной конструкции МрП (угол наклона $\alpha=0$; роторы расположены по координате x симметрично расточек полюсов статоров), принудительным отклонением системы роторов ($k>1$) до совмещения их торцевых поверхностей с плоскостью магнитопровода статоров с последующим снятием удерживающего усилия наблюдались затухающие колебания в диапазо-

не $\pm \Delta x = (l-h)/2$ при варьировании величины l от $1,5h$ до $3,0h$. Отмечено, что собственная частота колебаний системы роторов с увеличением l заметно уменьшалась в диапазоне границ отклонения менее $\pm \Delta x_{max}$, определяемых совмещением торцевых плоскостей ротор-статор. В паре ротор-статор ($l=h$) частота собственных колебаний оказывается существенно выше комбинаций при $l=kh$, что указывает на проявление наибольшей жесткости центрирования в зоне совмещения плоскостей, а следовательно свидетельствует о нелинейности осевой центрирующей силы F .

Результаты этих экспериментов достаточно показательно на качественном уровне согласуются с числовым моделированием аксиальных силовых характеристик для взаимодействующей пары цилиндрических статора и ротора электродвигателя, представленных в работе [3] с.532. В основе формирования закономерности проявления аксиальной силовой реакции при наличии относительного осевого сдвига положен принцип изменения индуктивности электрических контуров статора и ротора электродвигателя, определяемый параметром $\lambda = L/L_s$, где: величина L_s и L соответственно характеризуют индуктивность в центральном положении $x=0$ и наличии сдвига $x \neq 0$. Энергия в воздушном зазоре при $x=0$ определяется выражением $W_s = \pi D l \delta B_L^2 / 4 \mu_0$ [Вт·с], где:

D – диаметр расточки полюсов статора, [м];

δ – величина кольцевого воздушного зазора, [м];

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – магнитная постоянная, [Гн/м];

B_L – максимальное значение индукции в воздушном зазоре, [Вб/м²].

Коэффициент уменьшения индуктивности в функции координаты смещения x с учетом неодинаковой длины статора и ротора, выражаемой параметром перекрытия $2\Delta l = l-h$, был установлен экспериментальным путем [3] Кучерой с использованием электрических моделей и определен выражением:

$$\lambda = 1 - \frac{x - \Delta l}{\pi l} \operatorname{arctg} \frac{x - \Delta l}{\delta} - \frac{x + \Delta l}{\pi l} \operatorname{arctg} \left(\frac{x + \Delta l}{\delta} \right) + \frac{\delta}{2\pi l} \ln \left[1 + \left(\frac{x - \Delta l}{\delta} \right)^2 \right] \left[1 + \left(\frac{x + \Delta l}{\delta} \right)^2 \right]$$

Результаты моделирования аксиальной силы F , проявляющейся в цилиндрических ЦЭ МрП с конкретными конструктивными параметрами по изменению магнитной энергии, определяемой зависимостью $F = -dW/dx = -(W_s/\lambda^2) d\lambda/dx$ по координате сдвига x для изменяемого параметра перекрытия Δl [мм] в размерной линейке 0; 1.5; 3.0; 4.5; 6.0 при длине расточки магнитопровода статора 6 мм и величине кольцевого воздушного зазора ЦЭ 50 мкм, полученные по выражению $F = (\delta D B_L^2 / 2 \mu_0 \lambda^2) \cdot \operatorname{arctg} x/\delta$ представлены на рис.2.

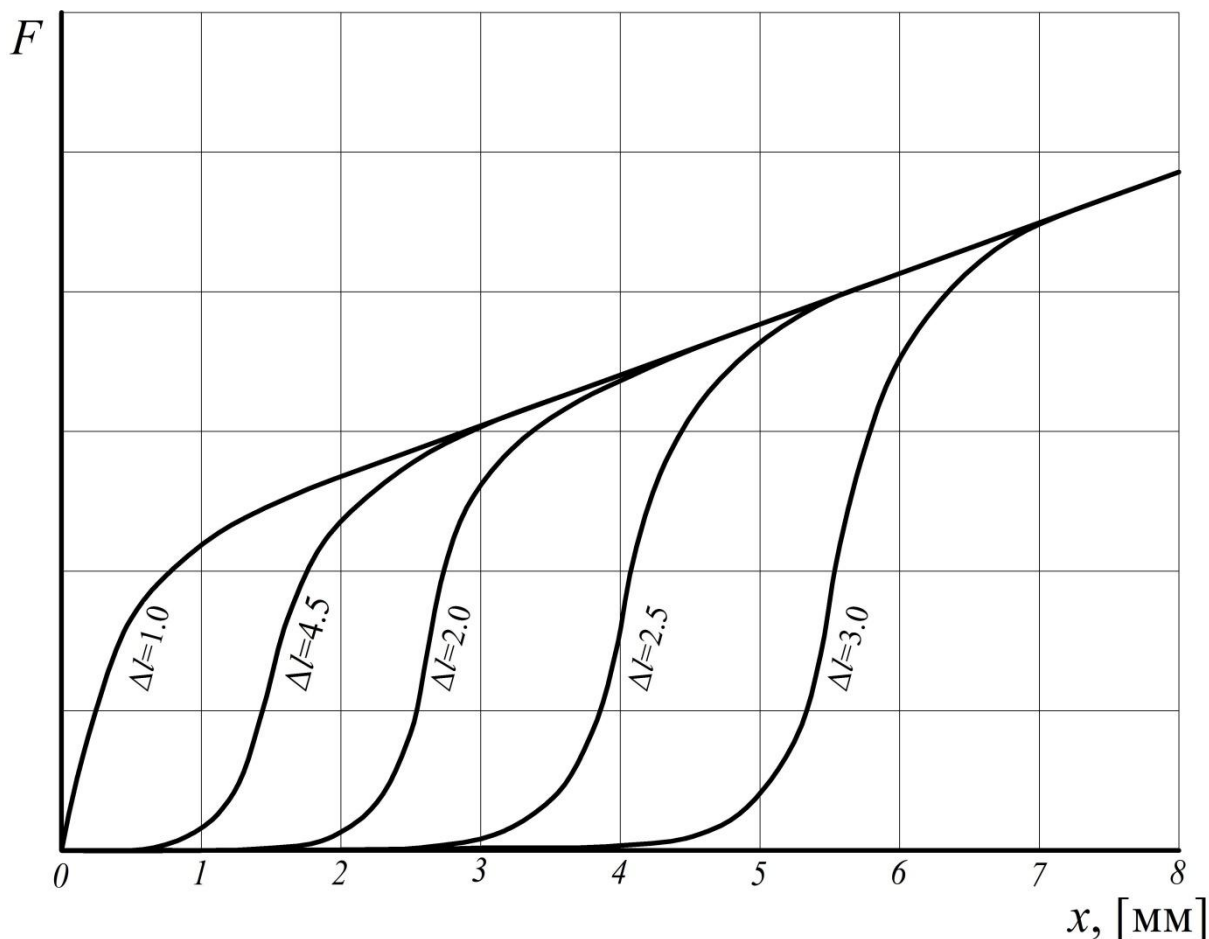


Рис.2. Характерные изменения F в функции смещения Δx и степени перекрытия Δl

Представленные зависимости аксиальных центрирующих сил, проявляемых в осевом канале МрП с цилиндрическими ЦЭ позволяют охарактеризовать их особенности по координате смещения роторов Δx из центрального расположения и степень ослабления жесткости при увеличении параметра перекрытия Δl . Так каждая зависимость $F=f(\Delta l)$, кроме $\Delta l=0$, представляется состоящей из двух нелинейных участков, существенно различающихся величиной жесткости $F_u/\Delta x$. На начальной стадии смещения при малых Δx отмечается наименьшая жесткость, а при достижении смещения $\Delta x=\Delta l$ жесткость становится наибольшей. Максимальная жесткость проявляется при совмещении торцевой поверхности роторов и плоскости магнитопроводов статоров ЦЭ фактически не зависит от величины перекрытия Δl . Но что является весьма важным, то что малая жесткость на начальных участках зависимостей $F=f(\Delta l)$ прогрессивно понижается с увеличением Δl .

Рассматриваемые зависимости проявления F_u не оцифрованы количественно, так как специфичность конфигурации ЦЭ МрП по отношению к конструкции электродвигателей требует существенной коррекции применяемых средств моделирования. По этой причине для определения количественного уровня силовой реакции МрП на осевые перемещения роторов был поставлен эксперимент по измерению величины F при вертикально ориентированной системе статоров ЦЭ и роторах, опирающихся через пружинный элемент на платформу медицинских весов с точностью регистрации усилий 10^{-4} грамм с цифровым

дисплеем. Методика определения F заключалась в тарированном вертикальном смещении системы статоров, закрепленных на подвижной консоли относительно роторов по координате x в диапазоне $\pm \Delta x$ и регистрации усилий в формате $mg+F$ и $mg-F$ от симметричного расположения пары статор-ротор ($x=0$).

В результате проведенной серии экспериментов удалось определить количественно реальные зависимости силовой реакции F по координате относительных осевых перемещений x в паре статор-ротор ЦЭ для различных величин Δl . Отмечено, что аксиальная жесткость на пологих участках $F=f(\Delta x)$ с увеличением Δl существенно снижается, а для $\Delta l=3$ мм зафиксирован предельный уровень, ограниченный возможностями регистрации измерительными средствами, величиной 10^{-7} г/мкм и имеет тенденцию дальнейшего уменьшения с ростом Δl . Измерение жесткости осевого центрирования на участках приближения $\Delta x \rightarrow \Delta l$ продемонстрировало ее практическую независимость от линейных размеров роторов и оценивается величиной $(3 \div 5) \cdot 10^{-5}$ г/мкм с сохранением диапазоне расположения по координате Δx .

Достижимый уровень ослабления жесткости МрП на цилиндрических элементах при $\Delta l=0.5h$ и фактическая линейность $F=f(\Delta x)$ для $\Delta l=3$ мм при смещениях $\Delta x=\pm 2.5$ мм открывает перспективы регистрации ускорений с пороговым значением менее $10^{-8}g$ при массе инерционного элемента 10 г даже в разомкнутой структуре акселерометра. Построение акселерометра в замкнутом компенсационном варианте, с участием силовых преобразователей по сигналам с датчика положения инерционной массы, позволит уменьшить пороговую величину измеряемых ускорений еще на 2-3 порядка.

Выводы

1. Обоснована эффективность снижения осевой жесткости МрП с цилиндрическими ЦЭ конструктивным решением сочетания размеров во взаимодействующей паре статор-ротор.
2. Теоретически и экспериментально выявлена и подтверждена зависимость проявления осевой центрирующей силы F МрП по координате относительного смещения элементов подвеса.
3. Предъявлена оригинальная методика экспериментального съема реальных зависимостей жесткости центрирования от степени перекрытия линейных размеров ротора и толщины магнитопровода статоров ЦЭ.
4. Оценены перспективы построения однокомпонентного акселерометра на МрП с цилиндрическими ЦЭ для регистрации ускорений с пороговым значением менее $10^{-10}g$.

Список литературы

1. Анцев Г.В., Богословский С.В., Сапожников Г.А. Проектирование устройств с электромагнитным подвесом / Г.В. Анцев. М.: Наука. 2010. 421 с.

2. Осокин Ю.А., Герди В.Н., Майков К.А., Станкевич Н.Н. Теория и применение электромагнитных подвесов. М.: Машиностроение. 1980. 284 с.
3. Шуйский В.П. Расчет электрических машин. Л.: Энергия. 1968. 732 с.