

Практическая концепция достижения предельных режимов структурной устойчивости процесса центрирования магниторезонансным подвесом

09, сентябрь 2017

Корниенко А. Н.^{1,*}, Горяева М. О.^{1,**}

УДК: 621.31

¹Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

^{*}epe@bmstu.ru

^{**}mery.95@mail.ru

Введение

Одним из перспективных направлений совершенствования метрологических характеристик современных разработок измерительных средств, предназначенных для навигации и управления летательными аппаратами [1], является применение бесконтактного магнитного взвешивания подвижных элементов конструкции. Вместе с тем традиционные варианты магнитных подвесов, реализуемые в поплавковых акселерометрах [2,3], характеризуются высоким уровнем жесткости центрирования, требуют сложной и дорогостоящей системы термостатирования при жидкостном заполнении, энергозатрат на ее функционирование, а также сопровождаются ростом габаритов.

В соответствии с тенденциями минимизации массогабаритных показателей проектируемых устройств для обеспечения компактности конструкции, в качестве альтернативы, представляется использование электромагнитного центрирования узлов вращения и линейных перемещений в воздушной и вакуумной среде. Наиболее существенные результаты совершенствования процесса взвешивания, без участия дополнительных средств демпфирования, были достигнуты на цилиндрических центрирующих элементах (ЦЭ) МрП в осевом варианте акселерометра, позволившем снизить порог чувствительности до 10^{-9} g [4]. Другим применением цилиндрических ЦЭ явилась разработка конструкции технологической установки для высокоточной балансировки тел вращения.

Конструкция МрП представляется сочетанием двух ЦЭ, состоящих из магнитопроводов статоров с внутренней цилиндрической расточкой полюсов в которую размещается цилиндрический ротор из ферромагнитного материала с кольцевым зазором δ_0 величиной 40÷100 мкм. Количество полюсов статора ЦЭ должно отвечать принципу формирования последовательности чередования N-S-N... их мгновенной полярности по окружности маг-

нитопровода. Таким образом для осуществления двухкоординатного пространственного центрирования магнитопровод статора выполняется либо четырехполюсным, либо восьмиполюсным, реже шестнадцатиполюсным в зависимости от расчетной силовой реакции на вес mg взвешиваемого узла. На полюсах статора располагаются катушки для последующего соединения с конденсаторами в структуры резонансных LC контуров каналов радиального центрирования МрП.

Рекомендуется предпочтительное объединение двухсекционных катушек противоположно ориентированных полюсов в мостовые схемы, как приоритетное по крутизне регулирующих токов, наилучшему проявлению условий достижения структурной устойчивости каналов центрирования, а также вдвое меньшему числу конденсаторов. На рис. 1 изображена схемно-конструктивная структура вертикального канала МрП отражающая силовое взаимодействие верхнего ВП и нижнего НП полюсов разностью регулирующих токов $\bar{I}_1 - \bar{I}_2$ при смещенном положении ротора Δ .

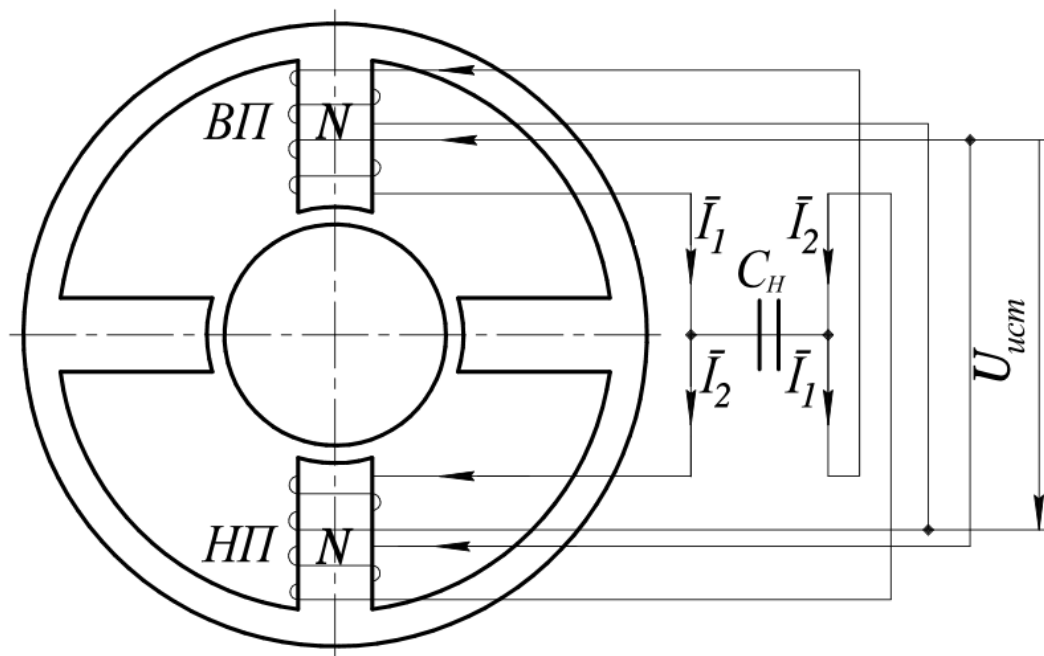


Рис. 1. Схемно-конструктивная структура канала центрирования МрП

Ориентация полюсов статора на разделение вертикального и горизонтального каналов радиального центрирования не принципиальна для осуществления двухкоординатной силовой реакции на минимизацию смещенного положения Δ ротора относительно геометрического центра расточки полюсов статора ЦЭ. Реализуемая поканально функция силового центрирования МрП определяется комплексом номинальных ($\Delta=0$) и текущих изменений ($\Delta \neq 0$) величин индуктивности $L_{ВП}$ и $L_{НП}$, сопротивлений активных потерь r_Σ , добротностей в формате $q=L \cdot \omega / r_\Sigma$, параметра настройки η резонансных LC контуров по условию $L \cdot \omega - 1/C_H \cdot \omega = \eta \cdot r_\Sigma$ выбором номинала C_H , соответствующим смещению ($\Delta \rightarrow 0$) при увеличении напряжения источника питания $U_{ист}$ на частоте ω .

Рекомендуемое повышение частоты питания схемы МрП связывается с обеспечением высокого градиента изменений индуктивных сопротивлений катушек ВП и НП, а, следо-

вательно, с ростом крутизны регулирующих токов, при этом увеличивается добротность LC контуров и уменьшаются номинал и габариты C_H . Резонансные LC контуры каналов центрирования настраиваются, как известно [2], выбором величины емкости конденсатора C_H на зарезонансном участке токовой характеристики $I(C)$ по параметру $\eta=1$ для реализации силовой функции внутренней обратной связи (ОС) на смещение Δ в паре ротор-статор ЦЭ. Однако наибольшее смещение $\Delta=\delta_0$ в начальной стадии центрирования, характеризующееся существенным уменьшением индуктивности LC контура ВП сдвигает резонансный экстремум $I(C_{рез\Delta})$, что может нарушить принцип формирования подъемной силы, если номинал C_H окажется меньше $C_{рез\Delta}$. В процессе перемещения ротора в центральное положение – $\Delta \rightarrow 0$ вследствие увеличения напряжения источника питания – следует ожидать роста активного сопротивления потерь r_Σ , приводящего к текущему снижению добротности, поэтому востребованность начальной высокой добротности LC контуров является актуальным требованием.

Для решения задачи достижения предельного режима центрирования МрП при добротности 2 ед. и настройке $\eta=1$, в условиях наличия собственных демпфирующих средств, необходимо уменьшать эквивалентное индуктивное сопротивление резонансного LC контура $X_{L_{экв}}=X_L-X_C$ выбором $C_H=2C_{рез}$ и обеспечить равенство $X_C=r_\Sigma$ емкостного сопротивления активному сопротивлению потерь, что следует из соотношения $L_0\omega - 1/2 \cdot C_{рез} \cdot \omega = \eta \cdot r_\Sigma$. Величина $X_{L_{экв}}$ фактически регламентирует необходимый объем магнитной энергии на бесконтактное взвешивание, а активным сопротивлением потерь r_Σ осуществляется структурная устойчивость процесса центрирования. Таким образом эффективность взвешивания МрП определяется особым сочетанием величин L_0 , $C_{рез}$, r_Σ , каждая из них является зависимой от конструктивных параметров ЦЭ: размеров и материала магнитопровода, количества витков и сечения намотки катушек, величины кольцевого зазора δ_0 , а также частоты и величины напряжения источника питания. Конструктивная проработка ЦЭ под необходимую грузоподъемность центрирования современными технологиями расчета [1] позволяют при задаваемом δ_0 порядка 40÷50 мкм на приемлемом уровне сформировать величину индуктивности L_0 , а, следовательно, при выбранной частоте ω определиться с номиналом $C_{рез}$. Однако рассчитать величину сопротивления потерь r_Σ проявляемой вследствие циклической частоты перемещения динамической площади петли гистерезиса материала магнитопровода при регулировании напряжения питания не представляется возможным.

В связи с изложенными аргументами управление ростом активного сопротивления потерь r_Σ до уровня $X_C=1/2 C_{рез} \cdot \omega$, в сложившихся эксплуатационных условиях конкретного типоразмера ЦЭ при достижении предельной величины напряжения питания $U_{ист}=U_{пред}$ по критерию $q=2$ ед., возлагается на вариативность частоты ω устанавливаемой в процессе проведения статических экспериментальных исследований.

Экспериментальные исследования предложенной концепции формирования резонансной структуры каналов радиального центрирования направлены на подтверждение принципиальных положений оптимизации процесса взвешивания на цилиндрических ЦЭ

МрП в воздушной среде. Для проведения серии статических исследований ЦЭ применялась специальная установка двухкоординатного перемещения ротора относительно неподвижно закрепленного статора. Выставка ротора в центральное расположение относительно расточки полюсов статора осуществлялась микрометрическими винтами и контролировалась обнулением сигналов в диагоналях мостов схемы МрП с помощью вольтметров. На рис. 2 представлена динамическая трансформация экспериментальных резонансных характеристик $I(C, \Delta)$ контура ВП при различных значениях смещений Δ ротора в расточке полюсов статора ЦЭ в процессе увеличения напряжения источника питания.

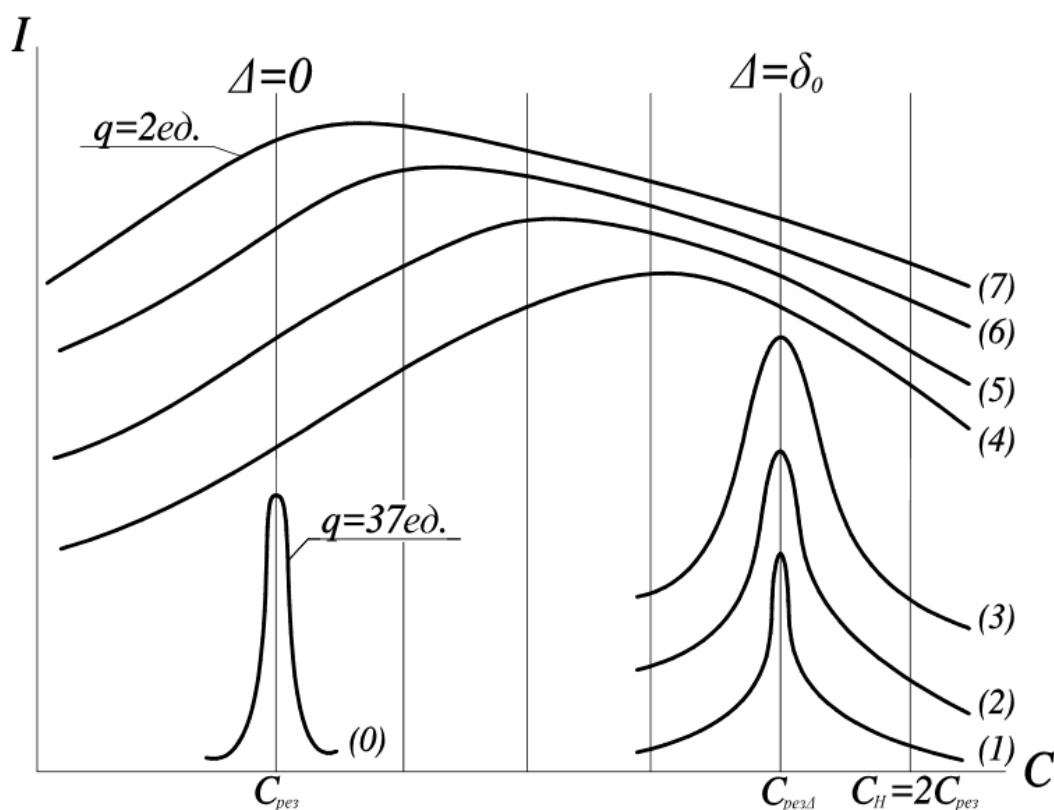


Рис. 2. Динамическая трансформация резонансных характеристик $I(C, \Delta)$ канала центрирования МрП

В условиях равномерного кольцевого зазора $\delta_0=40$ мкм, напряжение $U_{ист}=0.1$ В с частотой 10кГц осуществлялась настройка LC контура канала центрирования в резонансное состояние, что позволило зафиксировать величину $C_{рез}=0.23$ мкФ и добротность q равную 37 ед. Затем варьированием магазином емкостей с дискретностью 10^{-3} мкФ была получена резонансная характеристика $I(C)$, изображенная под номером (0). Увеличением напряжения источника определилось предельное значение $U_{пред}=9.6$ В, при котором добротность снизилась до 2 ед., после чего была снята резонансная токовая характеристика под номером 7, изображенная на рис. 2. Экспериментально проведенная оценка величины $C_H=0.474$ мкФ по стандартному критерию уменьшения тока $I=0.707 \cdot I_{рез}$ в точке $\eta=1$ на зарезонансной ветви $I(C)$ характеристики №7 показала 3% расхождение с рекомендуемым удвоением номинала $C_H=2C_{рез}=0.46$ мкФ.

В качестве подготовительной операции для нормирования процедуры центрирования произведена аттестация электрической реакции $U(\Delta)$ в диагонали моста при напряжениях питания от 1В до 10В с шагом 1В, настроечной емкости конденсатора $C_H=0.47$ мкФ в результате принудительных перемещений Δ ротора в диапазоне δ_0 с дискретностью 5мкм. Зависимости $U(\Delta)$ предназначаются для моделирования промежуточных резонансных характеристик $I(C)$ под номерами 4, 5, 6 для отражения изменений регулирующего тока ВП в функции смещения Δ и миграции точки настройки $\eta>1$ к позиции $\eta=1$.

Следующая группа экспериментов посвящена исследованию реального процесса взвешивания МрП горизонтально ориентированного валика, объединяющего два ротора размещенных в расточках статоров двух ЦЭ образующих конструкцию подвеса. В диагоналях мостовых резонансных контуров схемы МрП включены конденсаторы с номинальной емкостью 0.47 мкФ, а для измерения величины тока I последовательно с секцией катушки ВП включен миллиамперметр. Задача постановки проводимого исследования процесса центрирования состоит в определении напряжения в диагонали U и тока I при увеличении напряжения $U_{ист}$ с шагом 1В.

В результате изменения $U_{ист}$ до 1.7В произошел отрыв ротора из стационарного положения $\Delta=\delta_0$, что зарегистрировано наличием резонансных характеристик $I(C)$ под номерами 1, 2, 3 относительно $C_{рез\Delta}$. Анализ позиционирования тока I относительно C_H на представленных характеристиках $I(C)$ №1, 2, 3 свидетельствует о тенденции стремления параметра $\eta \rightarrow 1$ связываемой со снижением добротности. Наблюдаемое соотношение $C_{рез\Delta} < C_H$ соответствует принципу центрирования МрП.

Бесконтактное взвешивание происходящее при $\Delta < \delta_0$ обрабатывается моделированием на двухкоординатной установке смещенного положения ротора Δ эквивалентного реальному в процессе центрирования пересчетом измерений величин U и I в соответствии с ранее снятыми зависимостями $U(\Delta)$ при фиксированной линейке напряжений $U_{ист}$. Таким образом полученные характеристики $I(C)$ с номерами 4, 5, 6 свидетельствуют о смещении резонансных экстремумов при $\Delta \rightarrow 0$, снижении добротностей $q_6 < q_5 < q_4$ в связи с опережающим приращением индуктивного сопротивления $X_L(\Delta)$ ростом активного сопротивления $r_\Sigma(U)$, а также продолжающемся стремлении параметра настройки достичь величины $\eta=1$ в результате увеличения напряжения источника питания $U_{ист}=U_{пред}$.

Опережающее формирование величины $r_\Sigma(U)$ по отношению к приращению $X_L(\Delta)$ сопровождающее движение $\Delta \rightarrow 0$ характеризует внутреннюю способность структуры МрП к саморегуляции эффекта запаздывания, который проявляется текущим уменьшением угла сдвига фаз $\varphi = \arctg[(X_L - X_C)/r_\Sigma]$ между управляющим центрирование током I и растущим напряжением $U_{ист}$. Достижение величины $\varphi=45^\circ$, что соответствует условию настройки $\eta=1$ при добротности $q=2$ ед. на предельном цикле центрирования с декрементом затухания $d=1/q=0.5$, что обеспечивает структурную устойчивость каналов центрирования МрП в сочетании с проявлением эффекта инерционности механического фильтра от взвешиваемой массы и слабых демпфирующих качеств воздушной среды не противоречит утвер-

ждению структурной неустойчивости МрП при $\Delta=0$ из-за практически низкого градиента изменения индукции ΔX_L либо превышения $r_\Sigma > X_{Cн} \Rightarrow q < 2$ ед.

Заключение

Проведенные исследования показывают, что, таким образом, заложены принципы формирования структуры радиальных каналов центрирования МрП с мостовой схемой управления силовой реакцией на смещенное расположение ротора в расточке полюсов статора цилиндрических ЦЭ. Построена модель процесса взвешивания на ЦЭ МрП, позволяющая определить взаимодействие комплекса вариативных параметров элементов резонансных LC контуров для достижения эффективного проявления подъемной силы на предельном режиме структурно устойчивого центрирования.

Экспериментально подтвержденные критерии обеспечения структурной устойчивости каналов центрирования МрП, при взвешивании в воздушной среде, позволяют рекомендовать использование частотного диапазона питания от 10 кГц до 15 кГц для осуществления регуляторной функции при запасе добротности LC контуров в несколько десятков единиц с последующим снижением r_Σ на предельном цикле до $q=2$ ед.

Список литературы

- [1]. Анцев Г.В., Богословский С.В., Сапожников Г.А. Проектирование устройств с электромагнитным подвесом. М.: Наука. 2010. 422 с.
- [2]. Осокин Ю.А., Герди В.Н., Майков К.А., Станкевич Н.Н. Теория и применение электромагнитных подвесов. М.: Машиностроение. 1980. 284с.
- [3]. Пашаев А.М., Эфендиев О.З. Теория и практика магнитной левитации в машиностроении. М.: Машиностроение. 2009. 335с.
- [4]. Корниенко А.Н., Горяева М.О. Конструктивная схема высокочувствительного осевого акселерометра на цилиндрических центрирующих элементах магниторезонансного подвеса. // Наука и образование. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Электронный журнал 2016 №5. Режим доступа: <http://engsi.ru/doc/841912.html>