электронный научно-технический журнал
ИНЖЕНЕРНЫЙ ВЕСТНИК
издатель ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана»

Динамическая устойчивость магниторезонансного подвеса без внешнего демпфирования.

77-48211/501098

07, июль 2012

Корниенко А. Н., Диденко А. С.

УДК 621.31(075.8)

Россия, МГТУ им. Н.Э.Баумана
misterbumer@mail.ru
leks022@mail.ru

Применение магниторезонансного подвеса (МрП) для обеспечения бесконтактных линейных и угловых перемещений подвижных элементов высокотехнологичных изделий класса акселерометров и балансировочных установок наиболее эффективно при отсутствии вязкой среды. Достигаемый при этом низкий порог чувствительности сопровождается необходимостью замещения внешнего демпфирования соответствующей коррекцией амплитудных и фазочастотных характеристик базовой структуры подвеса.

Исследование динамики МрП [1] позволило предложить, в качестве альтернативы отсутствия демпфирования, использование дополнительных параллельных резонансных LC-контуров. Однако, их практическая реализация выявила существенное увеличение объёма элементов МрП вследствие габаритов конденсаторов ёмкостью в десятки микрофарад. Представляемый модифицированный вариант формирования блока LC−контуров с трансформаторным включением в структуру МрП является эффективным средством его миниатюризации.

Для характеристики особенностей процесса центрирования свойственного МрП и анализа принимаемых решений по обеспечению динамической устойчивости приведём описание конструктивного и схемного построения подвеса в базовой версии. Конструкция МрП образуется двумя центрирующими элементами (ЦЭ), выполняющими функцию бесконтактных опор.

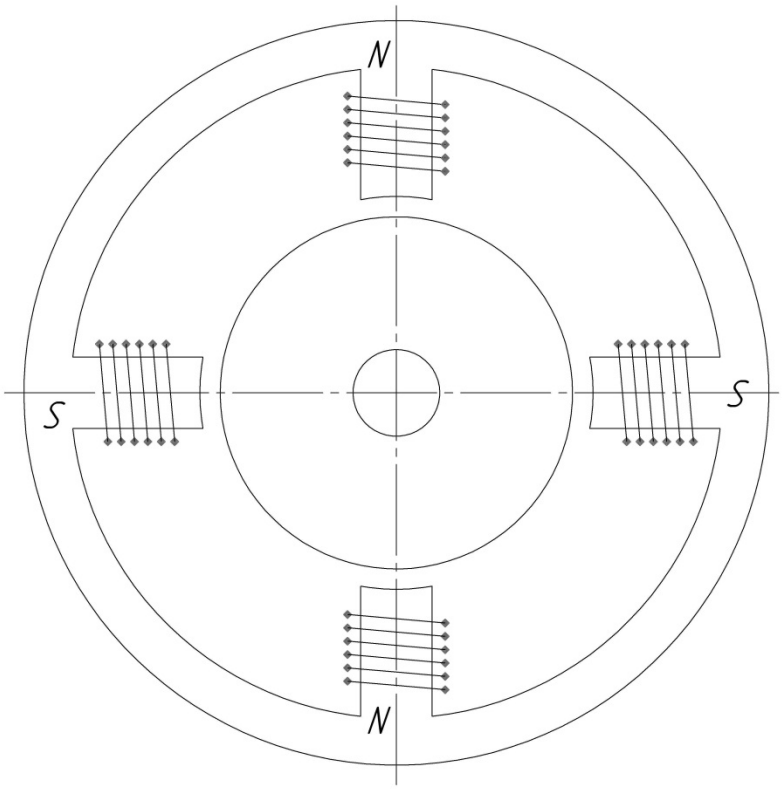

Рис. 1. Конструктивная схема ЦЭ

На рис. 1 представлен цилиндрический ЦЭ, состоящий из статора и ротора. Статор выполнен в варианте четырёхполюсного магнитопровода с размещёнными на полюсах двухсекционными катушками. Цилиндрический ферритовый ротор располагается во внутренней расточке торцевых областей полюсов статора с кольцевым зазором в несколько десятков микрон. В результате формирования электромагнитной структуры МрП обеспечивается бесконтактное взвешивание ротора в магнитном поле ЦЭ.

Схема управления двухкоординатным радиальным позиционированием ротора в расточке образуется соединением секций катушек расположенных на диаметрально ориентированных полюсах статора в электрические мосты.

На рис.2 представлена структура электрического моста функционально соответствующая одному каналу центрирования МрП.

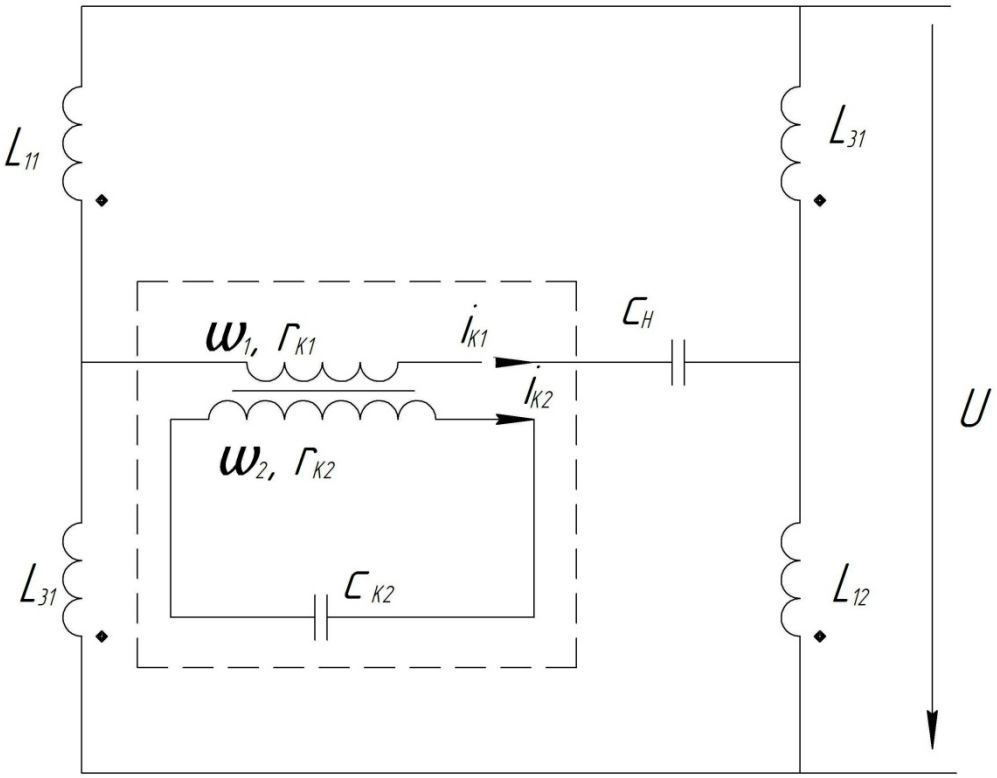

Рис. 2. Электрическая схема канала центрирования МрП.

Секции катушек взаимодействующих полюсов располагаются в противолежащих плечах моста и включены согласно. Два электрических моста ЦЭ обеспечивают мгновенную чередующуюся полярность сочетанием поканально N-N & S-S. В диагонали образованных электрических мостов включаются конденсаторы – $C_н$ с целью формирования центрирующих воздействий на радиальное смещение ротора.

Выбор величины емкости $C_н$ осуществляется по стандартной методике на зарезонасном участке резонансной характеристики эквивалентного последовательного LC-контура в соответствии с условием:

$$L\omega - \frac{1}{C_H\omega} = \eta r, \qquad (1)$$

где: L – величина индуктивности при центральном расположении ротора;

ω – круговая частота источника питания

Сн – величина настроечной емкости;

r – величина активного сопротивления резонансного контура;

η – параметр настройки.

Предпочтительная величина параметра η=1 обеспечивает максимальную жесткость каналов центрирования подвеса. Для достижения наибольшей компактности ЦЭ и наименьшего номинала Сн следует увеличивать частоту источника питания МрП в диапазоне до 10кГц. Происходящий при этом рост начальной добротности Q_0=Lω/r

резонансных LC-контуров сопряжен с увеличением потребностей в демпфировании. В условиях отсутствия достаточного уровня внешнего демпфирования в воздушной среде МрП при добротности $Q_0 > 30$ единиц и настройке η=1 не способен обеспечивать динамическую устойчивость каналов центрирования со структурой представленных ранее электрических мостов.

Одним из эффективных средств достижения динамической устойчивости МрП в маловязких средах является включение в базовую структуру дополнительных параллельных резонансных LC-контуров. По функциональному предназначению будем называть их демпфирующими. Техническая реализация электрического демпфирования МрП состоит в рассеивании избыточной колебательной мощности на дополнительном активном сопротивлении $R(\omega) = r_g$,обеспечиваемом резонансной настройкой параллельного LC-контура. Таким образом происходит некоторое снижение жесткости центрирования и обеспечивается оптимальная крутизна регулирующих токов в LC-контурах МрП с приведенной добротностью $Q_{\text{пр}} = L\omega/(r + r_{\text{д}})$ для динамической стабилизации каналов. Важной характеристикой демпфирующего контура является также крутизна изменения реактивной составляющей T(ω) полного сопротивления Z(ω) в диапазоне частот, который может захватываться при колебаниях МрП. Фактически это проявляется фазочастотной коррекцией структуры каналов центрирования МрП, достаточная степень которой обеспечивается добротностью демпфирующих контуров q более 10 единиц.

Условие настройки МрП с участием демпфирующих контуров представляется в виде:

$$L\omega - \frac{1}{C_H\omega} + T(\omega) = \eta\big(r + R(\omega)\big) \tag{2}$$

При этом активная составляющая сопротивления $r_g = R(\omega)$ при резонансной настройке демпфирующего контура определятся выражением:

$$r_g = q^2 r_k, \tag{3}$$

где $q = L_k\omega/r_k$ – добротность контура;

L_k, r_k - величина индуктивности и активного сопротивления катушки.

Соответствующая резонансная емкость Ск определяется следующей зависимостью:

$$C_k = \left(q + \frac{1}{q}\right) r_k \tag{4}$$

Выражения (3) и (4) связывают в единый взаимозависимый комплекс параметров r_k, r_g, L_k, C_k параллельного LC-контура в классическом исполнении, что не позволяет уменьшить его массогабаритные показатели, в разы превышающие объем элементов базовой структуры МрП. Для достижения компактности демпфирующих LC-контуров

предлагается его построение в двухконтурном варианте с разделением функций формирования величины добротности q и величины активной составляющей сопротивления r_g.

На рис.2 (выделенная область) представлен трансформаторный вариант демпфирующего LC-контура, первичная катушка которого с параметрами индуктивности L_{k1} и активного сопротивления r_{k1} включается последовательно с настроечным конденсатором $C_н$ в диагональ электрического моста схемы управления МрП. Вторичная катушка с параметрами L_{k2} и r_{k2} в сочетании с емкостью конденсатора C_{k2} образуют параллельный резонансный контур. Размещение секций витков первичной w_1 и вторичной w_2 катушек осуществляется на броневом ферромагнитном сердечнике. Преемственность классическому варианту построения демпфирующего контура оценивается идентичностью получаемых характеристик для модифицированного варианта.

Уравнения электрических и магнитных цепей исследуемого варианта демпфирующего контура имеет вид:

$$\begin{gathered} w_1 \frac{d\Phi}{dt} + r_{k1} i_{k1} = U \\ w_2 \frac{d\Phi}{dt} = r_{k2} i_{k2} + \frac{1}{C_{k2}} \int i_{k2} dt \\ \Phi R = w_1 i_{k1} - w_2 i_{k2}, \end{gathered} \tag{5}$$

где: w_1 и w_2 – число витков первичной и вторичной катушек соответственно;

Ф, R – величина магнитного потока и магнитного сопротивления;

i_{k1}, i_{k2} – величины электрических токов в первичном и вторичном контурах;

C_{k2} – величина емкости конденсатора во вторичном контуре;

U – величина напряжения на первичной катушке.

Подставим выражение для магнитного потока из третьего уравнения системы (5) в первые два, получим:

$$\begin{gathered} \frac{w_1^2}{R} \frac{di_{k1}}{dt} - \frac{w_1 w_2}{R} \frac{di_{k2}}{dt} + r_{k1} i_{k1} = U \\ \frac{w_1^2}{R} \frac{di_{k1}}{dt} - \frac{w_1 \omega w_2}{R} \frac{di_{k2}}{dt} - r_{k2} i_{k2} - \frac{1}{C_{k2}} \int i_{k2} dt = 0 \end{gathered} \tag{6}$$

Введем обозначения:

$$L_1 = \frac{w_1}{R};\ L_2 = \frac{w_2}{R};\ q_1 = \frac{L_1 \omega}{r_{k1}};\ q_2 = \frac{L_2 \omega}{r_{k2}};\ q_c = \frac{1}{C_{k2} \omega r_{k2}}.$$

Представим систему уравнений (6) в операторной форме записи:

$$i_{k1}\left(q_1\frac{S}{\omega}+1\right)-i_{k2}\frac{S}{\omega}\sqrt{q_1q_2\frac{r_{k2}}{r_{k1}}}=\frac{U}{r_{k1}}$$

$$i_{k1}\frac{S}{\omega}\sqrt{q_1q_2\frac{r_{k1}}{r_{k2}}}+i_{k2}\left(q_2\frac{S}{\omega}+1+q_c\frac{S}{\omega}\right)=0, \tag{7}$$

где S – оператор дифференцирования.

В результате совместного решения уравнений (7) относительно тока i_{k1} получим следующее выражение:

$$i_{k1}=\frac{U}{r_{k1}}\frac{q_2\frac{S}{\omega}+1++q_c\frac{S}{\omega}}{q_2\frac{S}{\omega}+1+q_c\frac{S}{\omega}+q_1\frac{S}{\omega}+q_1q_2} \tag{8}$$

Импеданс демпфирующего LC-контура представляется в следующем виде:

$$Z(S)=r_{k1}\left(1+q_1\frac{S}{\omega}-\frac{q_1q_2\frac{S^2}{\omega^2}}{q_2\frac{S}{\omega}+1++q_c\frac{\omega}{S}}\right) \tag{9}$$

В комплексной форме (9) после замены S=jω и учета параметра расстройки контура по частоте $\lambda=\omega_{рез}/\omega$, получим:

$$Z(j\omega)=r_{k1}\left(1+jq_1\lambda+q_1q_2\lambda^2\frac{1-j\left(q_2\lambda-\frac{q_c}{\lambda}\right)}{1+\left(q_2\lambda-\frac{q_c}{\lambda}\right)^2}\right) \tag{10}$$

Выбираем параметры контура при резонансной настройке на частоте источника питания (параметр λ=1), при которой его сопротивление будет чисто активным, что возможно при условии:

$$q_c=\frac{q_2+\sqrt{q_2^2-4}}{2} \tag{11}$$

Активное сопротивление контура определяется следующей зависимостью:

$$r_g = \left(1 + \frac{q_1 q_2}{1 + \left(\frac{q_2 + \sqrt{q_2^2 - 4}}{2}\right)^2}\right) r_{k1} \qquad (12)$$

При $q_1 = q_2 = q$ и $q^2 \gg 1$ (12) в пределе сводится к определению величины активного сопротивления по формуле:

$$r_g \approx q^2 r_1 \qquad (13)$$

Полученный результат (13) свидетельствует о том, что при равенстве добротностей первичного и вторичного контуров, а также резонансной настройке вторичного, трансформаторный вариант демпфирующего контура идентичен классической структуре параллельного резонансного LC-контура.

Исследуем поведение реактивной составляющей T(ω) комплексного сопротивления Z(jω) при $q_1 = q_2 = q$

$$\mathrm{T}(\omega) = \left(q\lambda - q^2\lambda^2 \frac{q\lambda - \frac{q_c}{\lambda}}{1 + \left(q\lambda - \frac{q_c}{\lambda}\right)^2}\right) r_{k1} \qquad (14)$$

Относительная крутизна изменения реактивного сопротивления $\mathrm{T}(\omega)$ в окрестности частоты ω определяется как:

$$\beta = -\frac{1}{r_g}\frac{dT}{d\lambda}\bigg|_{\lambda=1} \approx 2q \qquad (15)$$

Полученные выражения (13) и (15) относительно величины активного сопротивления r_g и крутизны изменения реактивного сопротивления β для трансформаторного варианта демпфирующего контура идентичны применяемым к параллельному резонансному LC-контуру в обычном исполнении. В связи с этим можно утверждать об его способности обеспечивать динамическую устойчивость каналов центрирования МрП.

Существенным преимуществом рассматриваемого двухконтурного варианта демпфирующего контура является возможность автономного формирования крутизны изменения T(ω) только параметрами элементов вторичного контура. А так как добротность этого контура определяется площадью сечения витков катушки, то варьируя количеством витков $w_{к2}$ можно значительно снижать номинал конденсатора $C_{к2}$.

Для демонстрации достигаемого эффекта уменьшения номинала, а следовательно и габаритов конденсатора в трансформаторном варианте демпфирующего контура по отношению к классическому параллельному LC-контуру, приведем результаты сравнительного расчета их величин при типовых требованиях обеспечения $r_g = 10$ Ом и q=10 единицам. В обычном исполнении на частоте источника питания 8кГц номинал конденсатора составил 20 мкф в габаритах гальванического элемента LR20, а в трансформаторном варианте демпфирующего контура номинал конденсатора снижен до 0,1 мкф, что представляется в габаритах четверти объема гальванического элемента LR03 типа AAA.

Необходимо отметить, что габариты блока демпфирующих контуров в классическом исполнении увеличивают объем базовой структуры МрП в составе двух ЦЭ и четырех конденсаторов $C_н$ в несколько раз. Тогда как в трансформаторном варианте габариты демпфирующих контуров не превосходят базовый объем МрП, что отвечает современным требованиям в обеспечении компактности разрабатываемых высокоточных устройств.

Литература.

1. Осокин, Ю.А., Герди В.Н., Майков К.А., Станкевич Н.Н. Теория и применение электромагнитных подвесов.-М.: Машиностроение, 1980.-284 с.