

Обеспечение структурной устойчивости процесса центрирования магниторезонансного подвеса при смещенном положении горизонтально ориентированного вала

11, ноябрь 2014

Корниенко А. Н., Свинаярева М. С.

УДК: 621.31

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана
deadkeng@gmail.com

Посвящается Н.Н. Станкевичу
от благодарных последователей

Статья посвящена исследованию возможности достижения динамической устойчивости магниторезонансного подвеса (МрП) средствами совершенствования внутренней структуры при центрировании в воздушной среде. Особенностью режима бесконтактного взвешивания горизонтально расположенного вала в центрирующих элементах (ЦЭ) МрП является наличие радиального смещения роторов ЦЭ в расточках полюсов статоров подвеса.

В многочисленных работах, представленных библиографией в монографиях [1,2], направленных на исследование динамики МрП в условиях центрального положения ротора относительно полюсов статора ЦЭ, утверждается его структурная неустойчивость при отсутствии внешнего демпфирования. Известное [2] радикальное средство – заполнение внутреннего объема устройства с магнитными опорами вязкой средой (жидкостью) в так называемом поплавковом варианте – исключается из рассмотрения как не соответствующее решаемой проблеме. Предлагаемые различные [1] варианты электрических средств демпфирования, безусловно, эффективны, однако увеличивают массо-габаритные показатели конфигурации МрП, что не отвечает современным требованиям по компактности.

Проводимый автором цикл исследований [3,4,5], направленных на минимизацию схемно-конструктивных решений МрП с цилиндрическими ЦЭ, позволил выявить существенно новые качества центрирования при высокочастотной структуре резонансных LC-контуров схемы управления на повышенных частотах напряжения питания от 10 кГц и выше. Специфика процесса центрирования резонансными LC-контурами МрП с начальной добротностью от 30 до 50 единиц проявилась текущим ее снижением с ростом подъемной силы подвеса при увеличении напряжения источника питания. Это обстоятельство

потребовало разработки адаптированной методики настройки [3] по параметру $\eta=1$ в перестраиваемом диапазоне напряжений питания.

При этом известное соотношение для оптимальной настройки $L_0\omega-1/C_H\omega=\eta r_{\Pi}$ выполнялось с учетом комплексного характера изменения не только индуктивного, но и активного сопротивлений LC-контуров верхнего (над ротором) и нижнего (под ротором) взаимодействующих полюсов канала центрирования МрП.

В представленном выше выражении использованы следующие параметры:

ω – круговая частота напряжения питания;

L_0 – величина индуктивности катушек полюсов при центральном расположении ротора в расточке полюсов статора ЦЭ;

r_{Π} – величина сопротивления активных потерь в резонансном контуре, соответствующая конкретной (определенной) величине напряжения источника – $U_{\text{пит}}$;

C_H – величина емкости настроенного конденсатора.

Повышенный градиент изменения приращений индуктивности $\pm\Delta L$ в верхнем и нижнем полюсах на частотах от 10 кГц в сочетании с имеющей место вариативностью изменений активного сопротивления потерь при наличии смещения элементов МрП обуславливают более сложный механизм формирования центрирующего эффекта в каналах МрП. Естественно, что статические и динамические качества МрП в рассматриваемом режиме потребовали детального изучения и представления новых закономерностей и факторов воздействия. Именно этот материал является предметом исследования и представления к публикации в этой статье.

Исследуемый процесс центрирования МрП может быть представлен состоящим из двух взаимосвязанных аспектов. На начальной стадии осуществляется практически статический процесс центрирования при малой величине жесткости, который характеризуется ростом подъемной силы с увеличением напряжения питания $U_{\text{пит}}$, текущим снижением добротностей при существенном возрастании сопротивлений потерь r_{Π} в резонансных LC-контуров взаимодействующих полюсов. Предельный рост подъемной силы лимитируется снижением добротности $Q=X_{L0}/r_{\Pi}$ величиной $Q=2$ единицам.

Так как при параметре настройки LC-контуров $\eta=1$ и рекомендуемом [4] наибольшем номинале $C_H=2C_{\text{рез}}$ следует из условия $X_{L0}-1/2\omega C_{\text{рез}}=\eta r_{\Pi}$ что определяется как $Q-1=1$, откуда $Q=2$. В соответствии с классической теорией МрП для обеспечения статических условий устойчивости так называемый коэффициент усиления $K=Q\eta/(1+\eta^2)$ должен быть больше единицы $K>1$, если $Q>2$ единиц.

Резюмируя технический аспект представленной стадии процесса центрирования, можно заключить, что при равенстве $r_{\Pi}=X_{CH}$ величин сопротивления потерь и емкостного сопротивления в LC-контуров дальнейшее увеличение подъемной силы невозможно, так как избыточная энергетическая накачка структуры МрП нарушает необходимые условия статической устойчивости. Заявленный технологически достижимый предел энергоемкости МрП, таким образом, ограничивается величиной проявления r_{Π} , которой обеспечивается диссипация избыточной энергии колебаний в элементах подвеса.

В динамическом аспекте исследования процесса центрирования МрП рассматриваются не учитываемые ранее в классической теории вопросы:

1. Характер текущих изменений параметров элементов резонансной схемы МрП r_{Π} (5) в сочетании с приращением $\pm\Delta X_L$ в функции смещения Δ и их участие в формировании резонансных характеристик величин добротностей, а также выбор частоты ω источника питания, материалов и конструктивного оформления ЦЭ, которыми определяется величина r_{Π}
2. Особенности проявления дифференциальной схемы взаимодействия полюсов МрП в мостовом варианте объединения двухсекционных катушек, раздельное представление об образовании и изменении регулирующих токов в функции величины смещение Δ , амплитудночастотные (АЧХ) и фазочастотные (ФЧХ) характеристики LC-контуров верхнего и нижнего полюсов в канале центрирования.

Предваряя освещение решаемых вопросов, представим принципиальную конструктивную схему канала центрирования МрП, изображенную на Рис.1а и схему управления на Рис.1б.

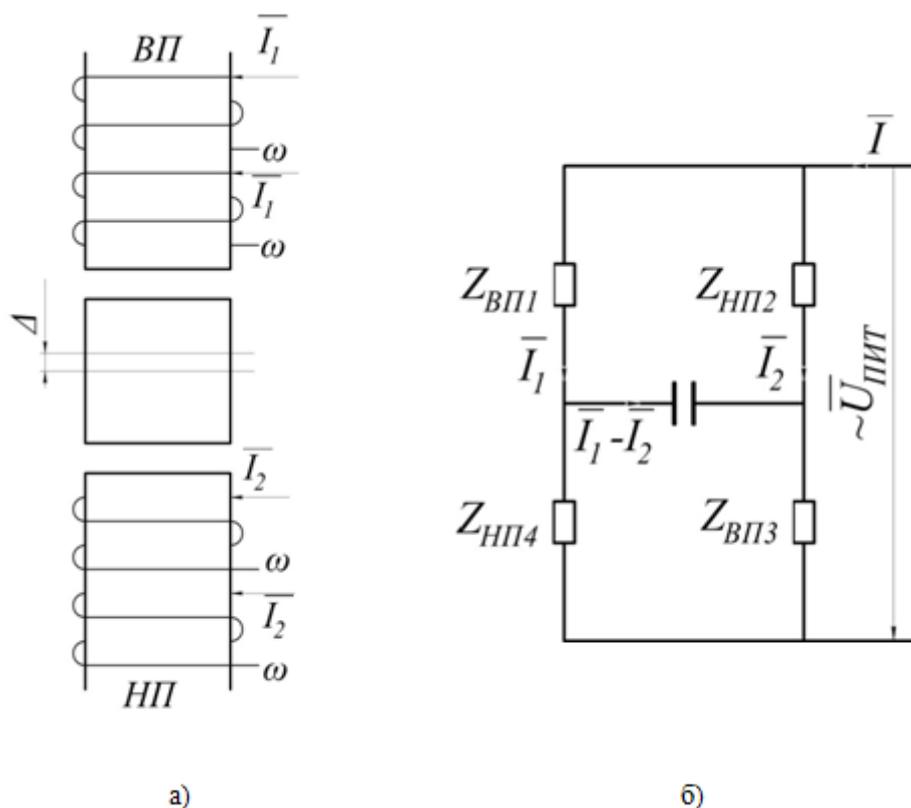


Рис.1. Конструктивная (а) и структурная (б) схемы центрирования канала МрП.

Конструктивно канал центрирования МрП представляется двумя полюсами ВП и НП (Рис.1а) статора ЦЭ с расположенными на каждом двухсекционными катушками с числом витков ω . В межполюсном пространстве размещается цилиндрический ферромагнитный

ротор со смещенным положением величиной Δ от геометрического центра под действием собственного веса mg . Разделяющий ротор и полюса статора кольцевой воздушный зазор при $\Delta=0$ оценивается величиной δ_0 , составляющей несколько десятков микрометров [мкм]. В полноформатном исполнении ЦЭ следует рассматривать состоящим из двух ортогонально ориентированных каналов центрирования при четырехполюсном статоре. Соответственно, подвес представляется наличием двух ЦЭ. Схема управления положением ротора относительно расточки полюсов статора ЦЭ образована объединением секций полюсных катушек в мостовую конфигурацию. Причем секции каждого из взаимодействующих полюсов размещаются в противоположных плечах моста, образуя резонансные LC-контуры для протекания токов \bar{I}_1 и \bar{I}_2 по соответствующим ветвям $Z_{ВП1}-C_H-Z_{ВП3}$ и $Z_{ВП2}-C_H-Z_{ВП4}$, т.е. через общую диагональ с включенным настроенным конденсатором C_H . ЦЭ совместно со схемой управления образуют электромеханическую структуру МрП с внутренней обратной связью (ОС) по бесконтактному позиционированию ротора относительно расточки полюсов статора. Главное требование, предъявляемое к процессу центрирования $\Delta \rightarrow 0$, является обеспечение динамической устойчивости при надлежащей жесткости центрирования без дополнительных средств демпфирования, что составляет задачу и цель проводимого исследования.

Рост подъемной силы, характерной для начальной стадии центрирования, сопровождается увеличением жесткости центрирования, допустимая степень проявления которой определяется внутренними резервами рассеяния энергии колебаний в структуре МрП и зависимостью от демпфирующих свойств внешней среды. Вторая стадия формирования жесткости центрирования, определяющая запас динамической устойчивости МрП, наступает при величинах смещенного положения ротора $\Delta \ll \delta_0$. Наиболее критичной зоной для резонансной схемы управления МрП является близость центрального расположения ротора т.е. $\Delta \rightarrow 0$, так как в этом случае градиент изменения индуктивности $\pm \Delta L$ ничтожно мал, индуктивные сопротивления ВП и НП почти равны $X_{ЛВП} \approx X_{ЛНП}$, регулирующие токи I_1 и I_2 посредством ампервитков закачивают избыточную магнитную энергию в структуру подвеса, имеющую ограничения на ее диссипацию.

Фактически система регулирования МрП в рассматриваемом контексте оказывается недееспособной, что, кстати, не противоречит концептуальным положениям динамики в классической теории. Однако наше объяснение существа происходящего процесса «замораживания» регулирующих качеств схемы МрП состоит в следующем трактовании: превышение величины напряжения питания $U_{ПИТ}$ некоторого предела приводит к существенному росту сопротивления потерь $r_{П}$, превосходящем емкостное сопротивление $X_{СН}$, определяемое величиной настроенного конденсатора $C_H = 2C_{РЕЗ}$, что влечет за собой снижение добротности $Q < 2$ единиц и, следовательно, потерю устойчивости центрирования.

Предлагаемые многочисленные варианты достижения динамической устойчивости электрическими средствами, усложняющими основную структуру МрП, по сути имитируют внесение дополнительного демпфирования, так как сопровождаются снижением добротности LC-контуров с увеличением номинала C_H . Более того, даже внешнее демп-

фирование при жидкостном заполнении объема устройств с ЦЭ МрП не эффективно для роста жесткости центрирования при равенстве $r_{П}=X_{СН}$. Поэтому вопрос обеспечения динамической устойчивости МрП сводится к эффективному формированию внутренних возможностей диссипации, определяемых $r_{П}=X_{СН}$, а если $r_{П}$ оказывается менее $X_{СН}$, это означает появление ограничения на достижение предельно возможного уровня жесткости, и для его снятия требуется дополнительное участие внешнего демпфирования.

Для характеристики внутренних резервов структурной устойчивости схемы МрП необходимо определиться с закономерностями формирования регулирующих токов в каналах центрирования. Рассмотрим зависимость регулирующих токов I_1 и I_2 на модели канала центрирования (Рис.1а) от смещенного положения ротора $\Delta \neq 0$, появляющихся при разбалансировке мостовой схемы управления МрП, изображенной на Рис.1б. Базовым положением для реализации центрирующей функции МрП, с соблюдением параметра настройки $\eta=1$, является неравенство регулирующих токов $I_1 > I_2$, которое обеспечивается соотношением комплексных сопротивлений резонансных контуров ВП и НП в формате $Z_{ВП} = \sqrt{(r_{П1})^2 + (X_{ЛВП}^{\Sigma} - X_{СН})^2} < Z_{НП} = \sqrt{(r_{П2})^2 + (X_{ЛНП}^{\Sigma} - X_{СН})^2}$. В свою очередь $Z_{ВП}$ и $Z_{НП}$ представляются состоящими из активных сопротивлений потерь $r_{П1}$ и $r_{П2}$ в соответствующих контурах, а также результирующих индуктивных сопротивлений катушек верхнего $X_{ЛВП}^{\Sigma} = X_{L1} + X_{L3}$ и нижнего $X_{ЛНП}^{\Sigma} = X_{L2} + X_{L4}$ полюсов за вычетом емкостного сопротивления $X_{СН}$.

Для фиксированного напряжения $U_{Пит}$ при $\Delta \neq 0$ индуктивное сопротивление в контуре ВП $X_{ЛВП}^{\Sigma} = X_{L0} - \Delta X_{ЛВП}$ уменьшается относительно X_{L0} при $\Delta=0$, а активное сопротивление потерь $r_{П1}$ увеличивается растущими ампервитками I_{1w} при $I_1 = I_0 + \Delta I_1$, где I_0 – величина тока для $\Delta=0$, а ΔI_1 – его приращение. В контуре НП при тех же условиях происходит увеличение индуктивного сопротивления $X_{ЛНП}^{\Sigma} = X_{L0} + \Delta X_{ЛНП}$ пропорционально величине смещения Δ и уменьшение активного сопротивления потерь $r_{П2}$, также зависящего от ампервитков I_{2w} вследствие $I_2 < I_1$. Таким образом, следует полагать, что величины добротностей ВП $Q_1 = X_{ЛВП}^{\Sigma} / r_{П1}$ снизится, а НП $Q_2 = X_{ЛНП}^{\Sigma} / r_{П2}$ возрастет. Добавление к параметру стрелки, направленной вверх, означает рост его величины и наоборот направленной вниз характеризует уменьшение его величины.

Представленные рассуждения относительно воздействия величины смещения Δ в механической структуре подвеса на характер формирования активной и реактивной составляющих комплексных сопротивлений резонансных контуров ВП и НП канала центрирования МрП, являющихся регуляторами соответствующих токов I_1 и I_2 позволяет проследить тенденции их изменения при росте жесткости центрирования с увеличением напряжения $U_{Пит}$. Отмечаем, что с уменьшением величины смещения $\Delta \rightarrow 0$ наблюдается абсолютный рост токов I_1 и I_2 с сохранением неравенства $I_1 \uparrow > I_2 \uparrow$ при большем темпе изменения приращений $\Delta r_{П}$ относительно ΔX_L . По этой причине происходит снижение добротностей во взаимодействующих резонансных контурах с расширением полосы пропускания, что, при стремлении к предельному значению $Q=2$ единицам, благотворно сказыва-

ется на коэффициенте затухания $d=1/Q$, равном разности граничных верхней (ВГ) и нижней (НГ) частот $(\omega_{ВГ}-\omega_{НГ})/\omega_0$ отнесенных к резонансной частоте ω_0 схемы МрП.

При формировании величины $\gamma_{П}=X_{СН}$ с целью улучшения динамических качеств подвеса мы руководствовались рекомендацией, представленной в работе [] на с.20 о соотношении характерных частот применительно к структуре МрП в виде $\Omega_0 \ll \omega_e < \omega_0 < \omega$, где:

Ω_0 – собственная частота механической части подвеса;

ω_e – сопрягающая частота электромагнитного преобразователя;

ω_0 – собственная частота электрической схемы подвеса;

ω – частота источника питания.

Сопрягающая частота ω_e для МрП структуры определяется разностью частот $\omega-\omega_0$, стало быть, выбор $C_{Н}=2C_{РЕЗ}$ позволяет поднять величину ω_e и тем самым обеспечить условия достижения наибольшей собственной частоты механической системы, продуцируемой жесткостью центрирования.

С учетом ведущей роли $\gamma_{П}$ в обеспечении структурной устойчивости МрП необходимо отразить средства, способствующие ее технологически грамотному проектированию. Прежде всего, это выбор материалов для изготовления магнитопровода ЦЭ с достаточно емкой по потерям мощности динамической петлей гистерезиса. К таким материалам можно отнести феррит марки 6000НМ и пермаллоевый листовой сплав марки 79НМ или 81НМА с толщиной листа 50мкм. Должны быть также определены эффективные параметры конструкции, такие, как величина зазора δ_0 и количество витков ω в катушках статора. Следует признать, что наиболее гибким инструментом регулирования величины $\gamma_{П}$ является частота источника питания, которой определяется число циклов перемагничивания проявляющихся мощностью потерь, что обуславливается эффектом магнитной нелинейности в ферромагнитных материалах.

Предпочтение, отданное авторами мостовой схеме МрП в качестве регулятора процесса центрирования, обусловлено дифференциальными качествами взаимодействия токов резонансных контуров ВП и НП. В дифференциальном варианте объединения LC-контуров проявляется свойство, очень важное для обеспечения динамической устойчивости, встречное протекание регулирующих токов I_1 и I_2 в общей диагонали через $C_{Н}$. Такая связь для каждого из полюсов является обратной отрицательной в объединенной структуре МрП и при наличии смещения $\Delta \neq 0$ выполняет функцию форсирующего звена введением производной по перемещению $\dot{\Delta}(t)$ в закон регулирования.

В качестве корректирующих средств амплитудно-частотных (АЧХ) и фазочастотных характеристик (ФЧХ) собственной структуры МрП, при стремлении смещения $\Delta \rightarrow 0$ вследствие увеличения $U_{ПИТ}$, необходимо представлять характер изменения приращений величин ΔX_L и $\Delta \gamma_{П}$, которыми определяется процесс формирования регулирующих токов, а следовательно, динамические показатели центрирования.

Произведем количественные оценки изменений параметров элементов структуры МрП $X_{L_{ВП}}^{\Sigma}$ и $X_{L_{НП}}^{\Sigma}$, а также величин добротностей Q_1 и Q_2 и регулирующих токов I_1 и I_2 в

резонансных контурах ВП и НП при увеличении напряжения $U_{\text{пит}}$, позволяющего обеспечить рост жесткости центрирования. В резонансном контуре ВП при наличии смещения $\Delta \neq 0$ параметр индуктивности определяется $X_{L_{\text{ВП}}}^{\Sigma} = X_{L_0} - \Delta X_{L_{\text{ВП}}}$, а при $\Delta \rightarrow 0$ отмечается его рост $X_{L_{\text{ВП}}}^{\Sigma} \uparrow = X_{L_0} - \Delta X_{L_{\text{ВП}}} \downarrow$, вследствие отрицательного приращения $\Delta X_{L_{\text{ВП}}} \downarrow$, тогда как с увеличением тока $I_1 \uparrow$ при росте ампервитков $I_1 w \uparrow$ происходит увеличение сопротивления потерь $r_{\text{ПВ}} \uparrow$ относительно $r_{\text{П1}}$ для $\Delta \neq 0$ на $\Delta r_{\text{П1}}$, т.е. $r_{\text{ВП}} \uparrow = r_{\text{П2}} + \Delta r_{\text{П2}}$. Для НП в его резонансном контуре при $\Delta \neq 0$ параметр индуктивности определяется как $X_{L_{\text{НП}}}^{\Sigma} = X_{L_0} + \Delta X_{L_{\text{НП}}}$, а при $\Delta \rightarrow 0$ происходит его уменьшение $X_{L_{\text{НП}}}^{\Sigma} \downarrow = X_{L_0} - \Delta X_{L_{\text{НП}}} \uparrow$ в процессе снижения приращения $\Delta X_{L_{\text{НП}}}^{\Sigma} \downarrow$, отмечается также рост $r_{\text{П2}}$ на приращение $\Delta r_{\text{П2}}$, т.е. $r_{\text{НП}} = r_{\text{П1}} + \Delta r_{\text{П1}}$ вследствие увеличения тока $I_2 \uparrow$.

Рассмотренные тенденции изменения соотношения регулирующих токов контуров ВП и НП в зависимости от приращений величин $\Delta r_{\text{П}}$ и $\Delta r_{\text{Л}}$ при неравенстве $\Delta r_{\text{П}} > \Delta X_{\text{Л}}$ могут быть отражены следующими выражениями: $I_1 \uparrow = U \uparrow / \sqrt{(r_{\text{ВП}})^2 \uparrow + (X_{L_{\text{ВП}}}^{\Sigma} \uparrow - X_{\text{СН}})^2 \uparrow}$ и $I_2 \uparrow = U \uparrow / \sqrt{(r_{\text{НП}})^2 \uparrow + (X_{L_{\text{НП}}}^{\Sigma} \downarrow - X_{\text{СН}})^2 \downarrow}$. Справедливость представленных выражений, демонстрирующих абсолютный рост величин I_1 и I_2 при $\Delta \rightarrow 0$ объясняется стремлением к равенству сопротивлений потерь $r_{\text{П}}$ и емкостного сопротивления $X_{\text{СН}}$, в результате которого $X_{L_{\text{ВП}}} = 2X_{\text{СН}}$ и, стало быть, знаменатель в обоих случаях будет характеризоваться минимальным значением в процессе предельного центрирования.

Наличие не центрального $\Delta \neq 0$ расположения ротора в межполюсном пространстве канала центрирования МрП сопровождается образованием собственных резонансных токовых характеристик контуров ВП и НП со смещением экстремумов относительно базовой резонансной характеристики для $\Delta = 0$ с фиксированной настройкой $\eta = 1$ при $C_{\text{Н}} = 2C_{\text{РЕЗ}}$ и добротностью Q_0 . Вследствие чего параметр настройки резонансного контура ВП оказывается меньше единицы $\eta_{\text{ВП}} < 1$ при добротности $Q_1 < Q_0$, а параметр настройки резонансного контура НП будет превышать единицу $\eta_{\text{НП}} > 1$. С ростом жесткости центрирования при $\Delta \rightarrow 0$ будет наблюдаться схождение экстремумов резонансных токовых характеристик, сближение величин добротностей $Q_1 \approx Q_2 \approx Q_0$ и, следовательно, стремлению $\eta_{\text{ВП}} \rightarrow 1$ и $\eta_{\text{НП}} \rightarrow 1$. Такой критический набор параметров резонансных LC-контуров $X_{L_{\text{ВП}}}^{\Sigma} \approx X_{L_{\text{НП}}}^{\Sigma}$; $r_{\text{П1}} \approx r_{\text{П2}}$; $Q_1 \approx Q_2$ объясняет утрату центрирующих качеств системы регулирования МрП.

Детальное объяснение процессам, происходящим в схеме МрП, при достижении равенства $r_{\text{П}} = X_{\text{СН}}$ в результате выбора $C_{\text{Н}} = 2C_{\text{РЕЗ}}$, состоит в том, что внутренние резервы на структурную стабилизацию оказываются исчерпанными, собственная частота Ω_0 механической части подвеса приближается к границе ширины полосы пропускания резонансного LC-контура и порождает модулированные колебания с нарастающей амплитудой, которые свидетельствуют о срыве устойчивости процесса центрирования при $Q < 2$ единиц. При этом несущая частота источника питания ω подавляется фильтрующей способностью инерционной массы взвешиваемого тела.

Если технологически не ставится задача формирования $r_{\text{П}}$ равным $X_{\text{СН}}$, то процедура проявления модулированных колебаний на собственной механической частоте состоится при достижении меньшей жесткости относительно потенциально возможной для МрП в

условиях ограничения или отсутствия внешнего демпфирования. В этом случае для увеличения жесткости центрирования в динамически устойчивом режиме МрП необходимо дополнительное участие внешнего демпфирования.

Анализ происходящей трансформации параметров индуктивности X_L и активных потерь r_{Π} резонансных контуров ВП и НП при $\Delta \rightarrow 0$ в канале центрирования МрП позволят зафиксировать на качественном уровне процесс изменений ФЧХ. Угол сдвига фаз резонансного LC-контура ВП, определяемый по выражению $\varphi_{ВП} = \arctg[(X_{ЛВП}^{\Sigma} \uparrow - X_{СН})/r_{ВП} \uparrow]$ при темпе изменения приращений $\Delta X_L < \Delta r_{\Pi}$ указывает на сдерживание вносимого запаздывания при движении к значению 45° . Тогда как угол сдвига фаз в контуре НП $\varphi_{НП} = \arctg[(X_{ЛНП} \downarrow - X_{СН})/r_{НП} \uparrow]$, характеризуемый величиной $\varphi_{НП} > 45^\circ$ при $\Delta \neq 0$ стремится снизить запаздывание для $\Delta \rightarrow 0$ уменьшением $\varphi_{НП}$ до 45° .

Существующее распределение функциональных возможностей МрП по управлению реакцией изменения величин токов I_1 и I_2 в формате степени опережения-запаздывания на смещение $\Delta \rightarrow 0$ и даже при частотных вариациях $\Delta \uparrow \downarrow$ на увеличение либо уменьшение благотворно сказывается на обеспечении динамически устойчивых показателей процесса центрирования.

Для определения эффективности практического применения теоретически представленных положений нового подхода к решению проблемы достижения устойчивого режима центрирования МрП без дополнительных средств внутреннего и внешнего демпфирования были проведены экспериментальные исследования процесса электромагнитного взвешивания чувствительного элемента (ЧЭ) одноосного линейного акселерометра с цилиндрическими ЦЭ. Фото акселерометра со статорами ЦЭ и ЧЭ по отдельности представлено на рис.2.

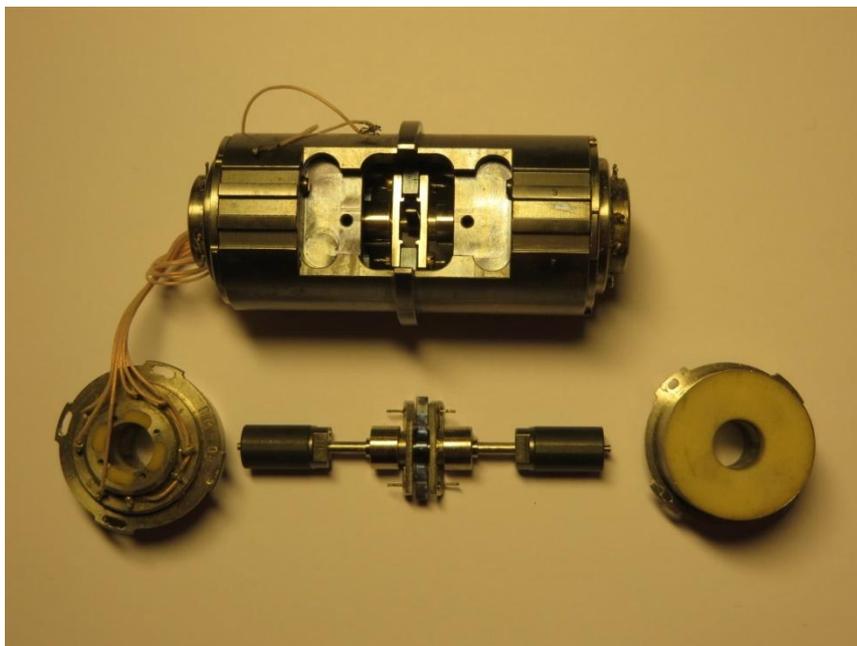


Рис.2 Фото акселерометра со статорами ЦЭ и ЧЭ по отдельности

Бесконтактное взвешивание ЧЭ, выполненного в виде валика с установленными на концах роторами ЦЭ, осуществлялось с участием четырехполюсных статоров, размещенных в торцевых областях корпуса. Четырехполюсный магнитопровод статора с двухсекционными катушками залит керамическим наполнителем и представляется кольцеобразной цилиндрической таблеткой с внутренней областью по диаметру расточки полюсов. Такое конструктивное решение ЦЭ позволило рассчитывать на проявление малого вязкого демпфирования в кольцевой воздушной прослойке при $\delta_0=40$ мкм. Проведенная аттестация параметров ЦЭ на частоте 12 кГц позволила установить следующие показатели:

$L_0=0.69$ мГн – величина индуктивности двухсекционных катушек полюсов статора;

$r_{\Pi}=24.8$ Ом – сопротивление потерь в LC-контуре канала центрирования при $U_{\text{пит}}$ равном 5 В;

$C_{\text{рез}}=0.25$ мкФ – величина емкости конденсатора $C_{\text{рез}}$ при резонансе.

С учетом обеспечения равенства $X_{\text{сн}}=r_{\Pi}$ при предельно допустимой величине добротности $Q=2$ единицы, номинал настроечной емкости конденсатора $C_{\text{н}}=2C_{\text{рез}}$ составил 0.5 мкФ.

Экспериментальное исследование МрП, направленное на достижение предельно возможной жесткости центрирования, заключалось в увеличении напряжения $U_{\text{пит}}$ до потери динамической устойчивости. Регистрация зарождающихся модулированных колебаний, являющихся свидетельством неустойчивости процесса центрирования, осуществлялось наблюдением формы сигнала на экране осциллографа, подключенного к диагонали мостовой схемы соединения катушек полюсов в одном из четырех каналов МрП.

При взвешивании ЧЭ в воздушной среде критическая жесткость центрирования проявилась на частоте модулированных колебаний 242 Гц и составила 1.7 г/мкм, что при распределении веса ЧЭ $m_{\text{г}}=10$ г пополам на каждый ЦЭ отразилось смещением Δ менее 3 мкм. Для создания полученной жесткости потребовалось 4.8 В напряжения питания. Необходимо отметить, что $U_{\text{пит}}=4.8$ В оказалось меньшим по отношению к величине напряжения в условиях настройки $\Delta=0$, однако произошедший недобор сопротивления потерь $r_{\Pi}<24$ Ом при $Q>2$ единиц возможно был компенсирован присутствием воздушной среды.

Для выявления оптимальности применения рекомендуемых критериев формирования структуры МрП был апробирован режим центрирования с уменьшенным до 4 В напряжением питания. При этом в резонансных LC-контурах произведена коррекция номинала $C_{\text{н}}$ до величины 0.36 мкФ, а ожидаемое сопротивление r_{Π} составило 15.4 Ом, что отразилось на величине добротности 3.4 единиц.

Динамическая растрейка каналов центрирования в этом эксперименте зафиксирована на частоте 210 Гц, что характеризует снижение жесткости до 1.28 г/мкм. Таким образом, получила подтверждение справедливость предложенной процедуры формирования $r_{\Pi}=X_{\text{сн}}$ при равенстве $X_{\text{сн}}=2C_{\text{рез}}$ для добротности $Q=2$ единицы.

Исследования предельно возможной структурной устойчивости МрП в условиях вакуумной среды производились при разряжении 10^{-3} паскалей. В этом эксперименте отфильтровывалось участие воздушной среды на проявление динамической устойчивости

процесса центрирования МрП без внешнего демпфирования. Модулированные колебания для этого режима обнаружались на собственной частоте 195 Гц, что в сравнении с 242 Гц при наличии воздушной среды составляет падение до 1.1 г/мкм.

Заключение

Результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований по достижению предельной жесткости центрирования средствами внутренней структуры МрП как с участием воздушной среды, так и в условиях вакуума показали, что:

1. МрП при наличии смещенного положения горизонтально расположенного вала структурно устойчив, при соблюдении выше изложенных требований к формированию параметров LC-контуров.
2. Результаты экспериментального определения величины жесткости центрирования без средств внешнего демпфирования коррелируются с ранее полученными показателями, в частности, при введении с основную структуру МрП дополнительного электрического демпфирования параллельными резонансными двухполюсниками [3], а следовательно, принятая стратегия наделения МрП собственными качествами структурной устойчивости эффективна.

Выводы

1. Обосновано принципиально новое свойство МрП в обеспечении собственной структурной устойчивости процесса центрирования при наличии смещения в ЦЭ.
2. Представлены условия равенства сопротивления потерь r_{Π} и емкостного сопротивления $X_{СН}$ в резонансных LC-контурах взаимодействующих полюсов каналов центрирования МрП для достижения динамической устойчивости.
3. Предложены технологические средства формирования r_{Π} , заключающиеся в реализации параметра настройки $\eta=1$ при коррекции номинала конденсатора $C_{Н}=2C_{РЕЗ}$ равным удвоенному $C_{РЕЗ}$ и рекомендациях по рациональному проектированию ЦЭ.
4. Определена взаимосвязь изменений параметров элементов структуры МрП с величинами добротностей и токами, являющимися регуляторами АЧХ и ФЧХ в каналах центрирования при увеличении показателя жесткости.
5. Результатами экспериментальных исследований подтвержден динамически устойчивый режим центрирования МрП при собственной частоте 242 Гц в воздушной среде и 195 Гц зафиксированы в условиях вакуума, что соответствует достигнутой жесткости 1.7 г/мкм и 1.1 г/мкм, отвечающих практическим потребностям.

Список литературы

1. Анцев Г.В., Богословский С.В., Сапожников Г.А. Проектирование устройств с электромагнитным подвесом. –М.: Наука, 2010.-422с.

2. Осокин Ю.А., Герди В.Н. Майков К.А., Станкевич Н.Н. Теория и применение электромагнитных подвесов. –М.:Машиностроение,1980.-284с.
3. Корниенко А.Н., Диденко А.С. Динамическая устойчивость магниторезонансного подвеса без внешнего демпфирования // Наука и образование. МГТУ им.Н.Э.Баумана. Электронный журнал 2012 №7. Режим доступа <http://technomag.edu/doc/501098.html> (07.07.2012)
4. Корниенко А.Н., Корчагина А.В. Методика настройки высокочастотных каналов центрирования магниторезонансного подвеса // Наука и образование. МГТУ им.Н.Э.Баумана. Электронный журнал 2013 №11. Режим доступа <http://technomag.edu/doc/645384.html> (19.11.2013)
5. Корниенко А.Н., Свиная М.С. Влияние вариативности изменений параметров элементов высокочастотных LC-контуров магниторезонансного подвеса на процесс центрирования. // Наука и образование. МГТУ им.Н.Э.Баумана. Электронный журнал 2014 № 4. Режим доступа <http://technomag.edu/doc/709804.html> (04.04.2014)
6. А.С. 473051 СССР. Электромагнитный подвес / В.М. Кушуль, В.Н. Еремиев, В.Н. Григорьев и др. // Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки. 1975. №21, с.39.