ИНЖЕНЕРНЫЙ ВЕСТНИК

издатель ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана»

Методика настройки высокодобротных каналов центрирования магниторезонансного подвеса

77-48211/645384

11, ноябрь 2013 Корниенко А. Н., Корчагина А. В. УДК 621.31 (075.8)

> Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана <u>epe@bmstu.ru</u>

В современном приборостроении при создании высокочувствительных устройств навигационного класса, таких как акселерометры и гироскопы, эффективно применяется бесконтактное электромагнитное центрирование подвижных узлов [1]. МрП в наибольшей степени соответствует предъявляемым требованиям по компактности в связи с управления отсутствием электронных блоков центрированием. Дальнейшая перспективная минимизация конструктивного исполнения МрП связывается с использованием частоты питания до 20 кГц.

Для МрП более раннего поколения частота питания не превышала 3 кГц, что обеспечивало относительное постоянство параметров элементов резонансных LC-контуров на уровне добротности менее 10 единиц. Практика настройки LC-контуров с фиксированными параметрами известна и надежно отработана. На частотах питания МрП нового поколения добротность может достигать 30-50 ед., что существенно усложняет процесс центрирования. Проявляющаяся нелинейная зависимость индуктивности от величины напряжения питания и в особенности рост активного сопротивления потерь приводят к текущему изменению добротности LC-контуров. Эти особенности высокодобротной структуры МрП не обеспечиваются классической процедурой настройки LC-контуров по параметру $\eta = 1$.

В связи с вышеизложенными аргументами проводимое исследование ставит целью обоснование нелинейной модели процесса центрирования МрП на повышенных частотах питания. Задачей исследования является разработка методики настройки LC-контуров каналов центрирования МрП, которой обеспечивается эффективное центрирование в перестраиваемом диапазоне напряжения питания.

Специфика применяемых терминов в дальнейшем описании процесса центрирования МрП требует детализации объекта и изложения принципа формирования и управления силовыми характеристиками резонансных LC-контуров. МрП конструктивно представляется двумя центрирующими элементами (ЦЭ), состоящими из статоров и роторов, выполненных из ферромагнитных материалов. На рис.1 магнитопровод статора ЦЭ имеет четырехполюсную конфигурацию, во внутреннюю расточку которого с кольцевым зазором в несколько десятков мкм размещается цилиндрический ротор.



Рис.1 Мостовая схема канала центрирования МрП

Канал центрирования МрП образуется объединением в мостовую схему двухсекционных катушек диаметрально ориентированных полюсов статора ЦЭ. Секции катушек каждого из взаимодействующих полюсов расположены в противолежащих плечах электрического моста и включены согласно. Настроечный конденсатор $C_{\rm H}$ в диагонали моста сочетанием с индуктивностью катушек представляют резонансную структуру LC-контура канала центрирования. Двухкоординатное радиальное позиционирование ротора в расточке полюсов статора ЦЭ осуществляется двумя ортогонально формируемыми каналами с мгновенно чередующеюся полярностью полюсов попарно N-N и S-S.

Центрирующее воздействие ротор проявляется на при разбалансировке электрических мостов каналов МрП, вызываемой его смещением из центрального Силообразующая функция определяется положения. ЦЭ степенью изменения индуктивности катушек LC-контуров, где конденсатор C_н является регулятором проявляемой подъемной силы и жесткости центрирования.

Классическая методика определения величины емкости $C_{\rm H}$ для оптимальной настройки ($\eta = 1$) LC-контуров МрП в соответствии с [2] осуществляется по выражению $L\omega - 1/C_{\rm H}\omega = \eta r$, где:

L – величина индуктивности ЦЭ при центральном расположении ротора относительно полюсов;

r – активное сопротивление потерь в LC-контуре;

w – круговая частота источника питания;

 η – параметр настройки.

Реализация настройки по условию $\eta = 1$ характеризуется достижением второй точки половинной мощности, при которой обеспечивается наибольшая жесткость центрирования подвеса. Процедура настройки LC-контуров МрП заключается в получении резонансной зависимости тока в функции переменной емкости I(C), определения экстремума I_{pe3} и выбора соответствующего номинала $C_{\rm H}$ на зарезонансном участке по величине $I = 0,707 I_{pe3}$.

Представленная методика эффективна при постоянстве параметров элементов LCконтура и требует привязки к конкретной величине напряжения питания, что неприемлемо для МрП с высокодобротной структурой. МрП нового поколения могут эксплуатироваться в двух режимах центрирования, которые проявляются специфическими особенностями при настройке LC-контуров. В режиме достижения максимальной жесткости центрирования, при достаточном уровне внешнего демпфирования, условие $\eta = 1$ характеризуется незначительным отличием величины $C_{\rm H}$ от $C_{\rm pes}$. В этом случае нелинейность вебер-амперной зависимости $\Psi(I)$ потокосцепления от изменений тока катушек полюсов статора ЦЭ, вследствие уменьшения индуктивности, смещает точку настройки $\eta \rightarrow 0$, что неизбежно приводит к срыву процесса центрирования. Для режима МрП с ограниченным ресурсом демпфирования добротность LC-контура должна быть снижена либо введением дополнительных электрических средств демпфирования [3], либо рассматриваемой в данной работе структурной возможностью роста активного сопротивления частотных потерь в материале магнитопровода с увеличением напряжения питания.

Таким образом, обоснованная необходимость в изменении параметров питания требует обеспечения «плавающего» режима выбора номинала $C_{\rm H}$. Корректировка величины $C_{\rm H}$, осуществляемая по предварительно реализованному семейству резонансных зависимостей I(C) в предполагаемом диапазоне изменений напряжений питания, безусловно возможна, но технологически затруднена. Во втором режиме центрирования МрП целесообразно предварительно располагать величинами изменяемых параметров элементов LC-контуров для последующего предпочтительного выбора напряжения питания.

Выявленная многофакторность текущих изменений параметров элементов структуры от величины напряжения питания позволяет сформировать нелинейную модель процесса центрирования МрП. На этой основе разработана новая версия методики настройки высокодобротных LC-контуров. В качестве интегральной характеристики, совмещающей нелинейные изменения параметров элементов, избрана зависимость добротности – q, при резонансной настройке ($\eta = 0$) LC-контура от величины напряжения в перестраиваемом диапазоне питания. Каждая точка зависимости q(U) на фиксированной частоте питания – ω имеет информационное содержание о величинах

добротности q, резонансной емкости C_{pe3} и сопротивлении активных потерь – r_{κ} . Это позволяет адаптировать выбор номинала емкости - C_{μ} по условию $\eta = 1$ под конкретное напряжение по следующему алгоритму:

При известных величинах C_{pes} и добротности q по выражению $q = 1/\omega C_{pes}r_{\kappa}$ определяем сопротивление активных потерь $r_{\kappa} = X_C/q$;

Из условия резонанса $X_L = X_C$ при равенстве реактивных сопротивлений преобразуем выражение для настройки LC-контура $L\omega - 1/C_{\mu}\omega = \eta r_{\kappa}$ к виду $X_{Cpe3} - X_{C\mu} = \eta r_{\kappa}$.

Параметр настройки $\eta = 1$ обеспечивается равенством $X_{Cpe_3} - X_{C_H} = r_{\kappa}$, из которого определяем величину номинала $C_{\mu} = 1/(X_{Cpe_3} - r_{\kappa})\omega$.

Представленная версия новой концепции реализации оптимальной методики настройки ($\eta = 1$) каналов центрирования МрП позволяет учитывать вариативность изменений параметров элементов высокодобротных LC-контуров. В связи с имеющимися затруднениями расчета диссипативного сопротивления потерь в ферромагнитном материале магнитопровода ЦЭ предлагается экспериментальный способ формирования необходимого пакета исходных данных о параметрах: *q*; *C*_{*pe3}; <i>r*_{*k*}.</sub>

В качестве объекта экспериментального исследования был выбран цилиндрический ЦЭ в конструктивном варианте, изображенном на рис.1.

Магнитопровод статора собран из листов пермаллоя толщиной 50 мкм марки 81НМА. Ротор изготовлен из феррита марки 6000НМ. Кольцевой разделяющий зазор между полюсами и ротором составляет 40 мкм. Схема управления центрированием выполнена двухканальной соответствующим объединением секций полюсных катушек в электрические мосты.

Для проведения экспериментального исследования каналов центрирования МрП применялась специальная установка с двухкоординатным механизмом перемещения ротора относительно полюсов статора ЦЭ. При этом статор размещался в технологической оправке на неподвижной части конструкции, а ротор на подвижной площадке с устройством радиальных перемещений. Электрическая конфигурация контролируемой процедуры выставки ротора в центральное положение обеспечивалась обнулением показаний вольтметров, включаемых в диагонали мостовых схем каналов МрП.

Операция снятия зависимости добротности от напряжения питания q(U) заключалась в формировании последовательного резонансного LC-контура путем объединения индуктивностей каналов ЦЭ, подключении переменного магазина емкостей и регулируемого источника синусоидального напряжения. Для регистрации резонансной настройки исследуемого LC-контура потребовалось включение амперметра, а для измерения напряжения питания U и падения напряжения на конденсаторе U_C использовались цифровые вольтметры. Что касается информационного обеспечения эксперимента, то резонансное состояние контура фиксировалось достижением экстремума тока I_{pe3} подстройкой емкости C_{pe3} , отношением показаний величины напряжения питания U к току I_{pe3} определялось активное сопротивление потерь r_{κ} , отношением показаний вольтметров U_C к U фиксировалась величина добротности q.

В результате изменений напряжения питания в диапазоне от 0 до 200 mV с дискретностью 100 mV и соответствующей обработки показаний измерительных приборов была получена экспериментальная зависимость q(U) на частоте 8 кГц, представленная на рис.2.



Рис.2 Экспериментальная зависимость q(U) ЦЭ

Точкам зависимости q(U) при напряжениях, равных 500 mV, 1000 mV, 1500 mV, придан статус контрольных, где для наглядности указаны величины C_{pe3} и r_{κ} . В таблице сведены числовые оценки изменений ключевых параметров L и r_{κ} , которыми характеризуется добротность, а также величины C_{pe3} и C_{μ} при выбранных значениях напряжения питания.

U, mV	<i>q, ед</i> .	L, МГн	$r_{\kappa}, O M$	$C_{peз,}$ мк Φ	$C_{\scriptscriptstyle H,}$ мк Φ
500	23.5	0.847	1.8	0.49	0.51
1000	10.5	0.794	3.7	0.52	0.57
1500	6.2	0.755	6.0	0.55	0.65

Отмечаем прогрессивное снижение добротности по гиперболическому закону с увеличением напряжения питания. Анализ по степени воздействия на величину добротности LC-контура показывает приоритетное влияние более чем троекратного роста r_{κ} . Увеличение C_{pes} свидетельствует о 10%-ом уменьшении индуктивности L. Так, если сохранить $C_{\mu} = 0.51$ мкФ по первой строке для U = 500 mV, то уже при U = 1000 mV C_{pes} окажется больше C_{μ} (т.к. 0.52 > 0.51) и условие центрирования будет нарушено.

В результате экспериментального исследования совместного проявления нелинейности катушек и существенного роста активного сопротивления потерь в магнитопроводе ЦЭ установлена необходимость адаптации выбора номинала C_{μ} под конкретное напряжение питания. Полученные фактические оценки изменений параметров элементов подтверждает рассматриваемую версию модели центрирования МрП с высокодобротными LC-контурами.

Выводы

- 1. Выявлены особенности, свойственные высокодобротным каналам МрП, позволившие сформировать нелинейную модель процесса центрирования.
- Обоснована новая версия эффективной настройки LC-контуров МрП по условию η = 1 адаптацией номинала C_H в перестраиваемом диапазоне напряжений питания на повышенной частоте.
- 3. Экспериментально подтверждена концепция нелинейной модели МрП и реализован алгоритм настройки высокодобротных каналов центрирования.

Список литературы

- 1. 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.
- Корниенко А.Н., Диденко А.С. Динамическая устойчивость магниторезонансного подвеса в маловязких средах// Наука и образование. МГТУ им. Баумана. Электрон. журн. 2013. № 4. Режим доступа: <u>http://technomag.edu/doc/574148.html</u> (дата обращения 10.09.2013)