

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УПРУГИХ СВОЙСТВ РОТОРА НА ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ СИСТЕМЫ МАГНИТНОГО ПОДВЕСА

В.П. Верещагин, А.А. Михаленко,
А.В. Рогоза, И.Г. Руковицын, А.В. Спирин

Рассмотрены некоторые примеры по снижению амплитуды колебаний ротора на упругих частотах за счёт включения в регулятор системы магнитного подвеса (СМП) дополнительных корректирующих звеньев. Решение этой задачи связано с необходимостью комплексной оценки взаимного влияния корректирующих звеньев друг на друга и на уровень колебаний ротора в области соседних критических частот. Для этой цели использованы математические модели, разработанные в АО «Корпорация «ВНИИЭМ» для проектирования и анализа динамических свойств СМП. На основе сравнения амплитудно-частотных характеристик, полученных при моделировании СМП виртуального ротора, проведена оценка применения заградительных фильтров и звеньев специального типа. Полученные результаты могут быть интересны при обеспечении устойчивости и качества управления СМП.

Ключевые слова: система магнитного подвеса, упругие колебания ротора, амплитуда упругих колебаний, влияние корректирующих звеньев.

В предшествующих публикациях [1, 2] по анализу динамических процессов в системах магнитного подвеса (СМП) отмечалось, что упругие свойства ротора могут приводить к увеличению амплитуды колебаний ротора на некоторых критических частотах. Это наблюдается как в рабочем диапазоне скоростей вращения, так и за его пределами. Причём уровень колебаний может оказаться настолько большим, что возникает потеря устойчивости СМП.

Поскольку в рассматриваемом частотном диапазоне значения критических частот могут быть близкими друг к другу, то появляются противоречия при устранении отмеченного негативного влияния. Преодоление этих трудностей требует комплексного подхода, учитывающего взаимное воздействие отдельных критических частот друг на друга.

Целью данной статьи является исследование некоторых способов по снижению влияния упругих свойств ротора на динамические процессы

СМП за счёт дополнительного включения в регулятор различных типов корректирующих звеньев: заградительных фильтров (К1) и комбинированных звеньев специального типа (К2).

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) исходной замкнутой СМП, показанная на рис. 1, имеет несколько подъёмов на критических частотах. Первые две формы колебаний, характерные для двухопорного ротора как твёрдого тела, расположенные в частотном диапазоне рабочих скоростей вращения, имеют незначительный подъём, т. е. хорошо задемпфированы.

Наиболее часто встречающиеся в литературе и на практике случаи, которые относятся к первому типу корректирующих устройств и применяются в основном в разработках АО «Корпорация «ВНИИЭМ», представлены здесь для оценки преимуществ и недостатков и для возможности проведения сравнения их с другими устройствами типа К2.

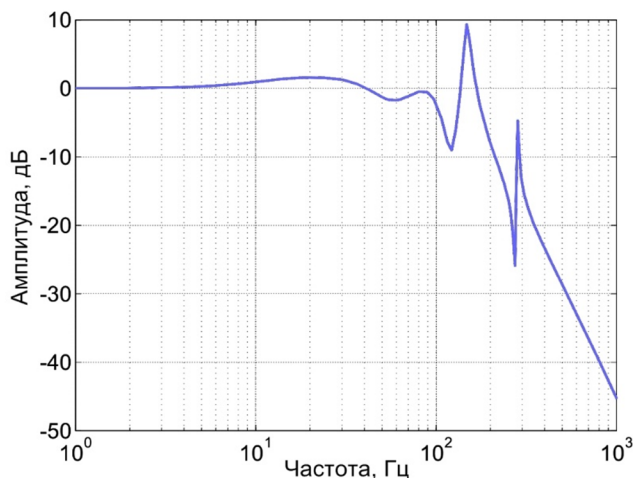


Рис. 1. АЧХ исходной замкнутой СМП

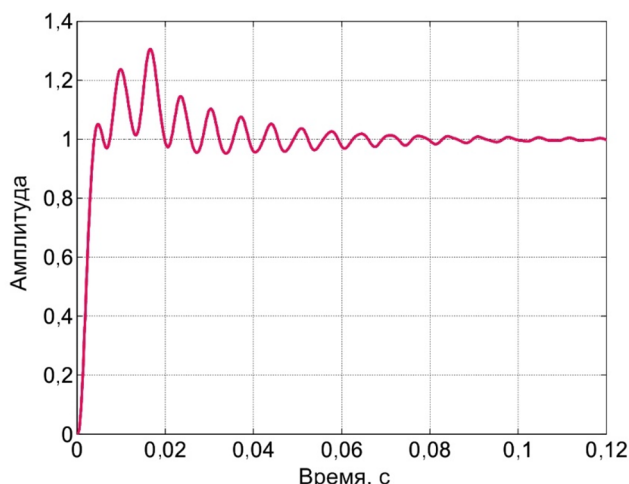


Рис. 2. ПФ исходной СМП

В качестве исходной СМП для проведения анализа воспользуемся данными по виртуальному ротору, рассмотренному в предыдущей нашей статье [2], посвящённой моделированию динамических процессов в СМП, в т. ч. на моделях замкнутой системы (МСЗ).

Однако по 1-й упругой форме колебаний ротора на частоте ω_{1y} наблюдается подъём до 9 дБ, что может негативно влиять на устойчивость и качество управления СМП.

В переходной функции (ПФ), показанной на рис. 2, заметны слабо затухающие колебания на этой частоте, что также свидетельствует об актуальности этой проблемы. Следовательно, задачей исследования является снижение уровня колебаний на упругих частотах ротора, в первую очередь 1-й упругой. Оцениваются динамические свойства СМП по интегральным критериям, включая амплитуду колебаний ротора на упругой частоте по АЧХ и длительность переходного процесса по ПФ.

Наиболее распространённым способом подавления упругих колебаний является применение в контурах управления СМП дополнительно к ПИД регулятору корректирующего звена (К1) в виде узкополосного заградительного (режекторного) фильтра (РФ), о котором упоминалось в монографии Ю.Н. Журавлёва [1].

Передаточная функция РФ, настроенного на частоту упругой формы ω_{1y} , имеет следующий вид:

$$W_{K11}(s) = \frac{T_{1y}^2 s^2 + 1}{T_{1y}^2 s^2 + 2\xi T_{1y} s + 1}, \quad (1)$$

где $T_{1y}=1/\omega_{1y}$ – постоянная времени фильтра, ξ – коэффициент демпфирования.

При частоте ω_{1y} коэффициент передачи РФ, в соответствии с уравнением (1), равен 0, что позволяет при включении его в цепь управления СМП предотвратить возбуждение упругих колебаний. Таким образом, при использовании РФ происходит «амплитудное» подавление упругих колебаний ротора.

Добротность РФ определяется коэффициентом ξ . Обычно $\xi \ll 1$ и более острый пик АЧХ РФ соответствует меньшим значениям ξ . Однако чрезмерное уменьшение ξ , т. е. применение РФ с высокой добротностью, является опасным, так как в этом случае незначительные отклонения параметра T_{1y} от фактического значения упругой частоты ω_{1y} приведёт к значительному изменению коэффициента передачи РФ и снижению его эффективности. Для уменьшения этого нежелательного эффекта в разработках АО «Корпорация «ВНИИЭМ» [3] принято смещать частоту настройки РФ в сторону снижения по сравнению с частотой упругих колебаний ω_{1y} . В этом случае, при уменьшении частоты настройки РФ, например, на 10% от ω_{1y} , происходит не только «амплитудное» подавление упругой частоты, но и изменение фазы на выходе РФ с отрицательной на положительную, в результате чего происходит «фазовая» стабилизация СМП. Такой подход позволяет менее критично относиться к выбору параметров фильтра T_{1y} и ξ в уравнении (1).

Кроме того, следует обратить внимание на существующие последствия применения такого «глу-

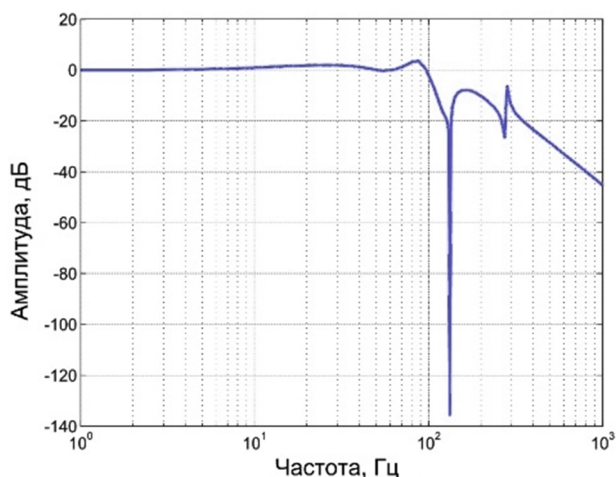


Рис. 3. АЧХ СМП с добавлением РФ В1

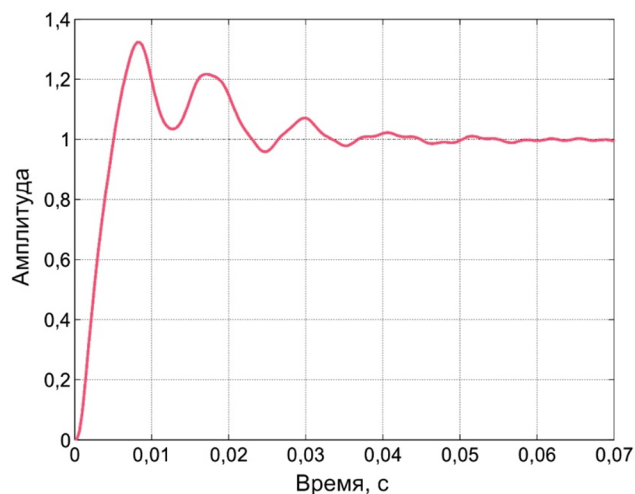


Рис. 4. ПФ СМП с добавлением РФ В1

бокого» РФ, который приводит к уменьшению запаса по фазе на некоторых критических частотах ротора рабочего диапазона скоростей. Это может негативно влиять на качество управления СМП на частотах ниже ω_{1y} из-за снижения значений фазовой характеристики на этих частотах.

Для пояснения изложенного сравним АЧХ исходной МСЗ, упомянутой выше, и варианта 1 (В1) с добавлением в цепь управления регулятора системы звена РФ с параметрами $T_{1y} = 1,2 \cdot 10^{-3}$ с и $\xi = 0,25$, выбранными с учётом рассмотренных в [3] рекомендаций. АЧХ и ПФ для В1 показана соответственно на рис. 3 и 4. Из сопоставления этих характеристик с исходными, показанными на рис. 1 и 2, видно, что при несомненном уменьшении амплитуды на частоте ω_{1y} (с 9,35 до -7,82 дБ) произошло увеличение уровня колебаний ротора на частоте кососимметричной формы ω_2 (с -0,477 до 3,49 дБ). Это свидетельствует о негативном влиянии РФ В1 на качество управления СМП на частоте ω_2 . Однако продолжительность переходного процесса, как видно из сопоставления ПФ рис. 2 и 4, снизилась ориентировочно в 1,5 раза (с 0,12 до 0,07 с). Следовательно, возникает задача поиска компромисса между «глубиной» АЧХ РФ и степенью влияния РФ на уровень колебаний ротора на частоте ω_2 .

В качестве одного из способов решения задачи является применение в некоторых разработках СМП для газоперекачивающих агрегатов РФ с уменьшенной «глубиной» АЧХ [4]. Передаточная функция такого РФ отличается от уравнения (1)

дополнительным слагаемым $a\xi T_{1y}$ в числителе и имеет следующий вид:

$$W_{K12}(s) = \frac{T_{1y}^2 s^2 + a\xi T_{1y} s + 1}{T_{1y}^2 s^2 + 2\xi T_{1y} s + 1}, \quad (2)$$

где a – коэффициент, определяющий «глубину» АЧХ РФ на частоте ω_{1y} .

Для оценки возникающих изменений в зависимости от типа РФ сравним АЧХ и ПФ для МСЗ В1 и варианта 2 (В2) с заменой в цепи регулятора системы звена РФ $W_{K11}(s)$ на РФ с $W_{K12}(s)$, имеющего параметры: $T_{1y} = 1,2 \cdot 10^{-3}$, $\xi = 0,25$ и $a = 1$. АЧХ и ПФ для В2 показаны соответственно на рис. 5 и 6.

Из сопоставления этих характеристик с предыдущими для В1 видно, что уровень колебаний ротора на частоте ω_2 заметно снизился (с 3,49 до 0,911 дБ), а на упругой частоте ω_{1y} несколько увеличился (с -7,82 до -0,558 дБ). Продолжительность переходного процесса, судя по ПФ рис. 6, практически сохранилась.

В целом АЧХ для МСЗ В2 в рабочем диапазоне скоростей (до 100 Гц) имеет небольшой подъём на частоте ω_2 до 0,911 дБ и существенное снижение на частоте ω_{1y} до -0,558 дБ, что свидетельствует о приемлемом качестве управления СМП. Следовательно, применение РФ В2 можно считать, в данном случае, предпочтительным по сравнению с РФ В1. Для удобства сопоставления рассмотренных вариантов применения различных РФ показатели АЧХ этих случаев сведены в табл. 1.

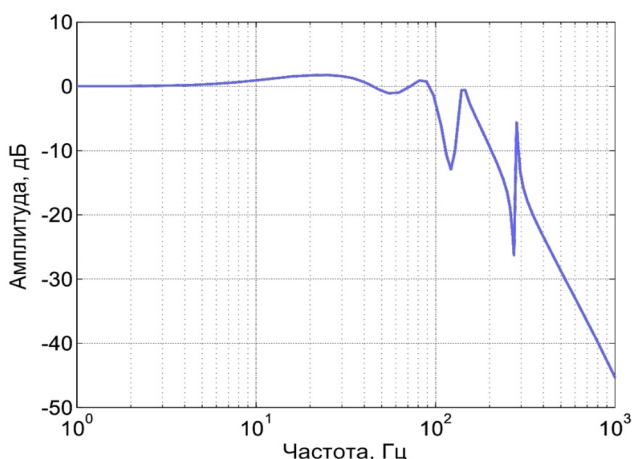


Рис. 5. АЧХ СМП при замене РФ В1 на РФ В2

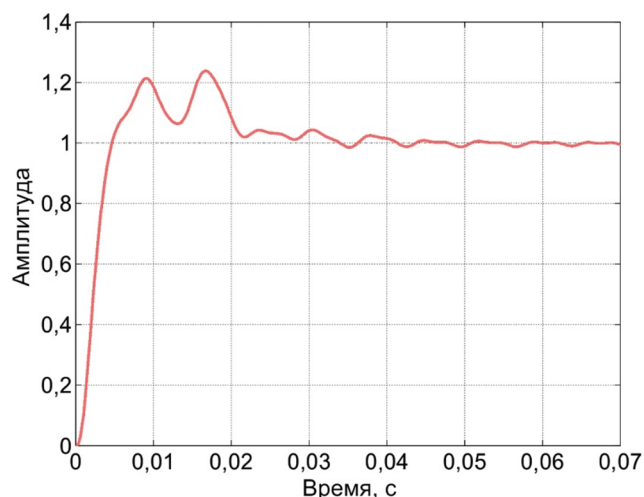


Рис. 6. ПФ СМП при замене РФ В1 на РФ В2

Таблица 1

Показатели АЧХ и ПФ для МСЗ с различными РФ (К1)

Частоты колебаний, Гц	Уровень колебаний, дБ		
	Исходная МСЗ	В1	В2
Симметричные, $\omega_1, 22$	1,56	1,95	1,73
Кососимметричные, $\omega_2, 80$	-0,477	3,49	0,911
Упругая 1, $\omega_{1y}, 148$	9,35	-7,82	-0,558
Упругая 2, $\omega_{2y}, 283$	-4,71	-6,34	-5,63
Время переходного процесса, с	0,12	0,07	0,07

Если сравнить вариант В2 с исходной МСЗ, то видно, что на упругих частотах ω_{1y} и ω_{2y} амплитуда колебаний ротора уменьшается при использовании РФ В2 по-разному: примерно в 3 раза на первой и только на 10% на второй соответственно. Таким образом, для более значительного снижения уровня колебаний ротора на частоте ω_{2y} может возникнуть необходимость в установке дополнительного РФ. В ряде случаев для подавления упругих частот, расположенных далеко друг от друга, может потребоваться комплексный подход по обеспечению необходимого уровня колебаний ротора на каждой из частот. Эта задача связана с выбором структуры и параметров отдельных звеньев, входящих в состав К2.

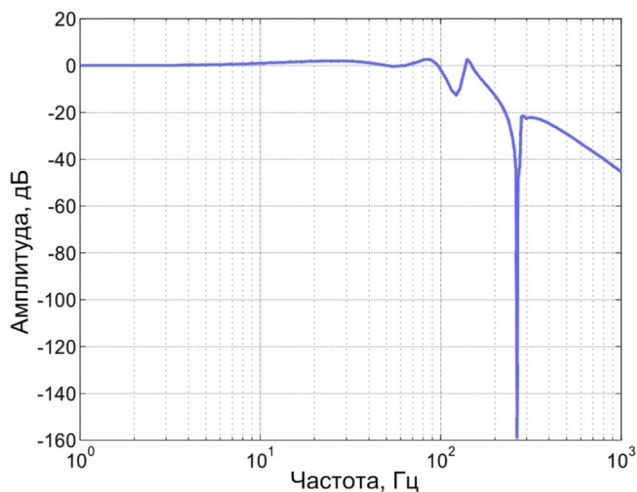


Рис. 7. АЧХ СМП с использованием комбинированного звена В3, состоящего из РФ

Представляет интерес сочетание «глубокого» РФ, выполненного в соответствии с уравнением (1) и настроенного на частоту ω_{2y} с учётом сдвига, и РФ варианта В2, настроенного на частоту ω_{1y} . Применение «глубокого» РФ в данном случае может быть оправдано стремлением получить наибольшее снижение уровня колебаний ротора на частоте ω_{2y} при относительно небольшом отрицательном влиянии их на низких критических частотах. В качестве практического примера комплексного подхода к подавлению одновременно двух упругих частот виртуального ротора рассмотрим применение объединённого звена К2, состоящего из РФ В2 и последовательно соединённого «глубокого» РФ на частоту ω_{2y} . В целом такое корректирующее звено К2 имеет передаточную функцию $W_{K23}(s)$ в следующем виде:

Применение такого дополнительного звена в цепи регулятора для проведения сравнения обозначим вариантом 3 (В3). АЧХ и ПФ для В3 показаны соответственно на рис. 7 и 8. Из анализа этих зависимостей следует, что комбинированное звено в соответствии с уравнением (3) обеспечивает по сравнению с исходной МСЗ более чем 7-кратное снижение амплитуды колебаний ротора (с -4,71 до -21,7 дБ) на частоте ω_{2y} 2-кратное (с 9,35 до 2,55 дБ) на частоте ω_{1y} .

$$W_{K12}(s) = \frac{1,44 \cdot 10^{-6} s^2 + 0,3 \cdot 10^{-3} s + 1}{1,44 \cdot 10^{-6} s^2 + 0,6 \cdot 10^{-3} s + 1} \times \frac{0,36 \cdot 10^{-6} s^2 + 1}{0,36 \cdot 10^{-6} s^2 + 0,3 \cdot 10^{-3} s + 1} \quad (3)$$

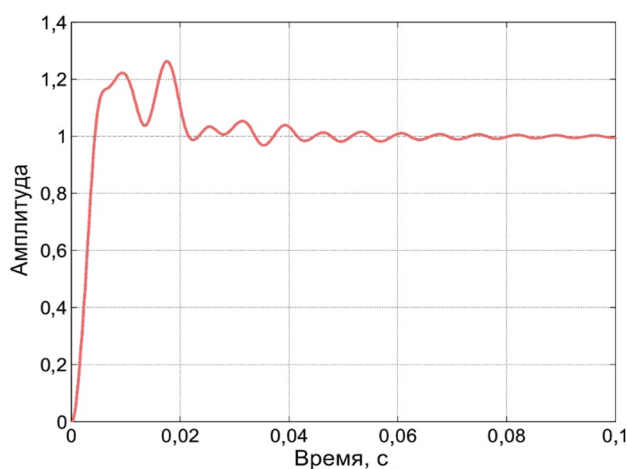


Рис. 8. ПФ СМП с использованием звена В3

На более низких критических частотах диапазона рабочих скоростей (ω_1 и ω_2) уровень колебаний ротора незначительно возрастает (соответственно с 1,56 до 1,95 дБ, с -0,477 до 2,61 дБ), что характеризует достаточные запасы по устойчивости и качеству управления в системе на этих частотах. Время и характер переходного процесса ПФ несколько улучшились.

Для наглядности сравнения показатели АЧХ и ПФ, полученные при моделировании процессов с комбинированными звеньями, сведены в табл. 2.

Интересные результаты по снижению колебаний ротора на упругих частотах можно получить при использовании специальных корректирующих звеньев, о которых упоминается в литературе [5], с передаточными функциями $W_{K2}(s)$ следующего вида:

$$W_{K2}(s) = \frac{b^2 T_y^2 s^2 + 2b\xi T_y s + 1}{T_y^2 s^2 + 2\xi T_y s + 1} \quad (4)$$

Особенность таких звеньев заключается в том, что значение коэффициента ξ выбирается значительно меньше 1 (например, $\xi=0,05 \div 0,2$), а коэффициент при постоянных времени T_y числителя и знаменателя отличаются незначительно (например, на 10%). В результате АЧХ таких звеньев представляют собой изломанные кривые с коэффициентом передачи на высокой частоте равным b^2 , а изменение фазочастотных характеристик (ФЧХ) звеньев в узкой полосе частот можно регулировать в достаточно широком диапазоне, меняя ξ . Причём, при $b > 1$, например $b=1,1$, фаза корректирующего звена будет положительной, а при $b < 1$, например $b=0,9$, фаза будет отрицательной. Таким образом, используя звенья с передаточной функцией вида (4) с разным сочетанием параметров, можно добиться как уменьшения амплитуды колебаний ротора в системе для её амплитудной стабилизации, так и изменения запаса по фазе для её фазовой стабилизации.

В качестве примера рассмотрим возможность снижения уровня упругих колебаний виртуального ротора с использованием комбинации двух корректирующих звеньев вида (4). Для уменьшения упругих колебаний 1-й формы применено звено с параметрами $b=1,1$ и $\xi=0,2$ для создания запаса по фазе, а снижение уровня упругих колебаний 2-й формы использовано звено с параметрами $b=0,9$ и $\xi=0,05$ для уменьшения коэффициента передачи звена на этой упругой частоте. В результате пере-

даточная функция этого комбинированного звена К2 имеет следующий вид:

$$W_{K24}(s) = \frac{0,97 \cdot 10^{-6} s^2 + 0,4 \cdot 10^{-3} s + 1}{0,81 \cdot 10^{-6} s^2 + 0,36 \cdot 10^{-3} s + 1} \times \frac{0,29 \cdot 10^{-6} s^2 + 0,054 \cdot 10^{-3} s + 1}{0,36 \cdot 10^{-6} s^2 + 0,06 \cdot 10^{-3} s + 1} \quad (5)$$

Следует отметить, что последовательное включение в К2 двух звеньев с $b_1=1,1$ и $b_2=0,9$ приводит к сохранению прежним суммарного коэффициента передачи К2 на высокой частоте (так как $b_1 b_2=1$), т. е. корректирующие свойства в системе достигаются без увеличения общего коэффициента передачи за пределами участка коррекции. Включение данного комбинированного звена К2 в цепь регулятора для проведения сравнения обозначим вариантом 4 (В4). АЧХ и ПФ для В4 показаны на рис. 9 и 10 соответственно, а основные показатели этих зависимостей для наглядности приведены в табл. 2.

Из анализа представленных зависимостей и данных табл. 2 следует, что комбинированное звено К2, выполненное в соответствии с выражением (5), обеспечивает достаточно высокое качество управления.

Уровень колебаний ротора в диапазоне частот рабочих скоростей вращения (ω_1 и ω_2) по сравнению с исходной МСЗ сохраняется практически неизменным. На упругих частотах (ω_{1y} и ω_{2y}) имеем

Таблица 2

Показатели АЧХ и ПФ для МСЗ с комбинированными звеньями (К2)

Частоты колебаний, Гц	Уровень колебаний, дБ		
	Исходная МСЗ	В3	В4
Симметричные, $\omega_1, 22$	1,56	1,95	1,55
Кососимметричные, $\omega_{1y}, 80$	-0,477	2,61	-0,881
Упругая 1, $\omega_{1y}, 148$	9,35	2,55	3,36
Упругая 2, $\omega_{2y}, 283$	-4,71	-21,7	-5,15
Время переходного процесса, с	0,12	0,1	0,08

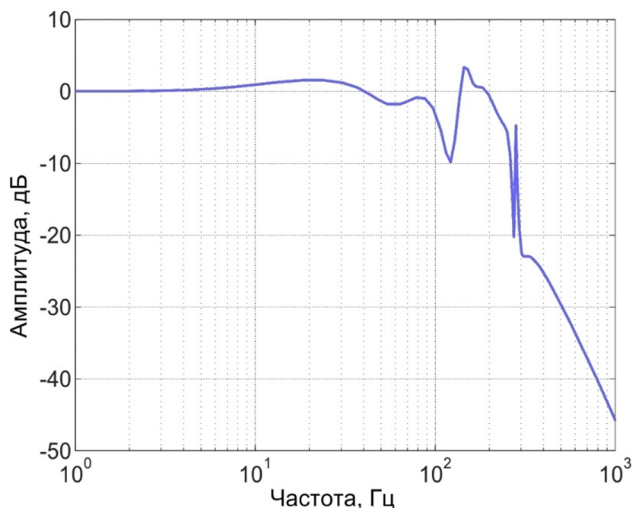


Рис. 9. АЧХ СМП при специальном комбинированном звене В4

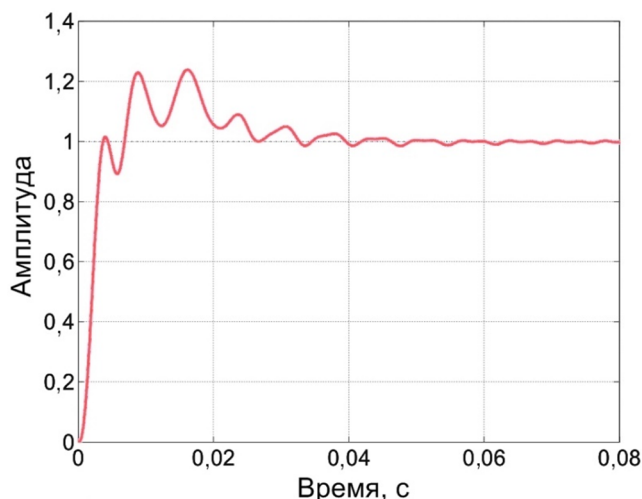


Рис. 10. ПФ СМП при звене В4

существенное снижение амплитуды колебаний ротора (с 9,35 до 3,36 дБ) и (с -4,71 до -5,15 дБ), что характеризует достаточно высокую эффективность использования звена К2 для данного виртуального ротора.

Судя по ПФ время переходного процесса, уменьшилось по сравнению с исходным вариантом в 1,5 раза, что указывает на хорошее демпфирование колебаний ротора системой управления. В целом положительное свойство применения комбинированного звена К2 В4, имеющего минимальное влияние на частоты ω_1 и ω_2 рабочего диапазона скоростей может быть привлекательным при выборе оптимального решения по снижению уровня колебаний ротора с упругой частотой, расположенной близко к рабочему диапазону.

Таким образом, задача выбора подходящего способа для снижения влияния упругих свойств на динамические процессы СМП конкретных роторов предполагает проведение математического моделирования. Анализ АЧХ и ПФ при дополнительном включении в регулятор различных корректирующих устройств можно проводить, используя подходы, рассмотренные в данной статье на примерах для виртуального ротора. Вместе с тем полученные результаты в данной статье не охватывают всего многообразия вариантов, которые могут возникать при вариации различных комбинаций корректирующих звеньев и их параметров. Однако некоторые выводы могут представлять практический интерес при перспективных исследованиях СМП в этом направлении.

Выводы

1. Показана возможность снижения уровня колебаний ротора на упругих частотах за счёт дополнительного включения в регулятор СМП заградительных фильтров или корректирующих звеньев специального типа.
2. Применение заградительных фильтров вместе со снижением уровня упругих колебаний может приводить к подъёму уровня колебаний на соседних и критических частотах в рабочем диапазоне скоростей.
3. Включение комбинированных корректирующих звеньев специального типа позволяет уменьшить негативное влияние по сравнению с применением заградительных фильтров.
4. На практике выбор способа снижения колебаний конкретного ротора можно проводить по результатам моделирования АЧХ и ПФ СМП для различных комбинаций корректирующих звеньев и их параметров.

Литература

1. Журавлёв Ю. Н. Активные магнитные подшипники. Теория, расчёт, применение / Ю. Н. Журавлёв. – СПб. : Политехника, 2003. – 206 с.
2. Верещагин В. П., Михаленко А. А., Рогоза А. В., Руковицын И. Г., Савинова Т. Н., Спирин А. В. Анализ динамических процессов системы магнитного подвеса / В. П. Верещагин и др. // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2014. – Т. 142. – № 5. – С. 13 – 24.
3. Васильченко А. Г., Кочетов Д. А., Лебедев В. М. Особенности систем автоматического управления с режекторными фильтрами / А. Г. Васильченко и др. //

Магнитный подвес роторов электрических машин и механизмов. Труды ВНИИЭМ. – 1989. – Т. 89. – С. 76 – 87.
4. Сарычев А. П., Руковицын И. Г. Особенности управления активными электромагнитными подшипниками газоперекачивающих агрегатов с гибкими роторами / А. П. Сарычев А. П., Руковицын И. Г. // Вопросы элек-

троемеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – 2009. – Т. 113. – № 6. – С. 13 – 18.

5. Maslen Eric. Magnetic Bearings / Eric Maslen // University of Virginia, Department of Mechanical Aerospace and Nuclear Engineering, Charlottesville. Virginia.

Поступила в редакцию 12. 11. 2015

Владимир Петрович Верецагин, д-р техн. наук, главный научн. сотрудник, т. (495) 365-50-73.

Артур Анатольевич Михаленко, инженер, т. (495) 366-42-11.

Александр Валерьевич Рогоза, канд. техн. наук, начальник НПК, т. (495) 366-04-79.

Илья Геннадьевич Руковицын, канд. техн. наук, старший научн. сотрудник, т. (495) 366-35-65.

Александр Васильевич Спириин, канд. техн. наук, ведущий специалист, т. (495) 366-26-10.

E-mail: vniiem@vniiem.ru.

(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

INVESTIGATION of ROTOR ELASTIC PROPERTIES for DYNAMIC PROCESSES in MAGNETIC BEARING SYSTEMS

**V.P. Vereshchagin, A.A. Mikhaleenko,
A.V. Rogoza, I.G. Rukovitsyn, A.V. Spirin**

Several methods for reducing of rotor vibration amplitude at elastic frequencies by means of additional compensating elements fitted into the magnetic bearing system (MBS) regulator are presented in the article. It is necessary to enable integrated assessment of mutual effect of compensating elements and their effect on rotor vibration in adjacent critical frequencies. Mathematical models created in JC 'VNIIEEM Corporation' for developing and analyzing of dynamic characteristics of MBS were used for it. Application of rejection filters and special type elements was evaluated on the basis of analysis of amplitude-frequency characteristics obtained during simulating of virtual rotor MBS. Obtained results may be useful by providing stability and guaranteeing control quality for MBS.

Key words: magnetic bearing system, rotor elastic vibrations, elastic vibrations amplitude, effects of compensating elements.

List of References

1. Zhuravlev Yu. N. Active Magnetic Bearings. Theoretical Treatment, Calculation Methods, Application / Yu. N. Zhuravlev. – St. Petersburg : Polytechnica Publ. – 2003. – P. 206.
2. Vereshchagin V. P., Mikhaleenko A. A., Rogoza A. V., Rukovitsyn I. G., Savinova T. N., Spirin A. V. Analysis of Dynamic Processes in Magnetic Bearing System. / V. P. Vereshchagin, at al. // Matters of Electromechanics. VNIIEEM Works. – 2014. – Vol. 142. – No. 5. – Pp. 13 – 24.
3. Vasilchenko A. G., Kochetov D. A., Lebedev V. M. Features of Automatic Control Systems with Rejection Filters / A. G. Vasilchenko at al. // Rotor Magnetic Bearings for Electrical Machinery. VNIIEEM Works. – 1989. – Vol. 89. – Pp. 76 – 87.
4. Sarychev A. P., Rukovitsyn I. G. Specifics of Control of Electromagnetic Bearings of Gas-Compressors with Super-Critical Rotors / A. P. Sarychev, I. G. Rukovitsyn // Matters of Electromechanics. VNIIEEM Works. – 2009. – Vol. 113. – No. 6. – Pp. 13 – 18.
5. Maslen Eric. Magnetic Bearings / Eric Maslen // University of Virginia, Department of Mechanical Aerospace and Nuclear Engineering, Charlottesville. Virginia.

Vladimir Petrovich Vereshchagin, D. Sc. in Engineering,

Chief Research Scientist. Tel.: (495) 365-50-73.

Artur Anatolyevich Mikhaleenko, Engineer. Tel.: (495) 366-42-11.

Alexandr Valeryevich Rogoza, Ph. D. in Engineering Science,

Chief of Scientific-Production Complex. Tel.: (495) 366-04-79.

Ilya Gennadyevich Rukovitsyn, Ph. D. in Engineering Science,

Senior Research Scientist. Tel.: (495) 366-35-65.

Alexsandr Vasilyevich Spirin, Ph. D. in Engineering Science,

Chief Specialist. Tel.: (495) 366-26-10.

E-mail: vniiem@vniiem.ru.

(JC 'VNIIEEM Corporation').