

МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОДШИПНИКОВ В АО «КОРПОРАЦИЯ «ВНИИЭМ»

Л.А. Макриденко, А.П. Сарычев, А.С. Абдурегимов, В.П. Верещагин, А.В. Рогоза

Рассмотрены основные положения и подходы к оценке динамических свойств систем электромагнитных подшипников, применяемых для компрессоров газоперекачивающих агрегатов. Представлены математические модели отдельных составных частей и системы управления подшипниками в целом, которые используются при анализе протекающих динамических процессов. Оценка устойчивости и качества управления при проектировании и исследованиях электромагнитных подшипников проводится по частотным характеристикам и переходным функциям, полученным на моделях для выбранных значений параметров управления. Такой подход позволяет выбрать проектный вариант, в наибольшей степени удовлетворяющий предъявляемым требованиям. В качестве примера рассмотрены частотные и переходные характеристики системы электромагнитных подшипников для виртуального ротора с параметрами близкими к одному из разработанных компрессоров. Судя по представленным динамическим характеристикам, можно определить существующие запасы по устойчивости и качеству управления системы электромагнитных подшипников. Кроме того, полученные результаты свидетельствуют о возможности преобразования сложной системы управления электромагнитами в относительно простое для анализа аperiodическое звено первого порядка. Это позволяет упростить исследования динамики системы электромагнитных подшипников и использовать для этой цели стандартную компьютерную программу Matlab Simulink.

Ключевые слова: электромагнитные подшипники, система управления подшипниками, математические модели, динамические процессы, частотные характеристики, переходные функции, критерии сравнения, устойчивость и качество управления.

Состояние и перспективы развития в АО «Корпорация «ВНИИЭМ» электромагнитных подшипников, рассмотренных в предыдущей публикации [1], позволяют сформировать некоторые общие подходы к решению вопросов проектирования элементов и системы электромагнитных подшипников (СМП) в целом для роторных машин различного назначения. Поскольку в литературе эти вопросы обычно рассматривались отдельно, то возникает необходимость в их обобщении. Кроме того, некоторые положения следует рассматривать комплексно с учётом специфики управления СМП.

По принципу действия СМП осуществляет стабилизацию положения ротора в центре относительно неподвижного статора машины и является замкнутой системой автоматического управления. В основе проектирования и исследования СМП обычно применяются известные методы электро-механики и теории автоматического управления.

Целью данной статьи является анализ методов проектирования элементов и СМП в целом с использованием математических моделей, которые применяются в АО «Корпорация «ВНИИЭМ» при разработке и исследованиях СМП роторных машин.

Задача исследований заключается в обосновании выбора структуры и параметров управления СМП. В качестве объекта исследований рассматривается типовая СМП для двухопорных роторных машин, в которых два радиальных магнитных

подшипника (РМП) и один осевой (ОМП) осуществляют пространственную стабилизацию положения ротора. РМП обеспечивают стабилизацию с соответствующих сторон ротора по поперечным осям. В каждом РМП объединено управление по двум поперечным осям ротора. Причём взаимными связями между осями в общей магнитной системе РМП, как отмечалось в предшествующих публикациях [2, 3] в первом приближении можно пренебречь.

В большинстве разработок АО «Корпорация «ВНИИЭМ» применяется раздельное управление каналами СМП для соответствующих степеней свободы движения ротора. В результате получается, что на один общий ротор воздействуют одновременно пять независимых каналов управления. Учитывая это, при анализе поперечных колебаний ротора в некоторых режимах, например, без учёта влияния гироскопических связей в роторе, можно ограничиться рассмотрением двух каналов РМП, расположенных в одной продольной плоскости с разных концов ротора.

Для исследования процессов динамики машин с СМП наибольшее распространение получили стандартные математические модели (М) устройств, входящих в замкнутую систему управления положением ротора. Точность описания в М физических процессов, протекающих в реальных устройствах, оказывает существенное влияние на получаемые результаты. Вместе с тем, учесть влияние всех факторов практически сложно, так

как М становятся громоздкими и реализовать их трудно. Поиск компромиссного решения по допустимому упрощению М имеет важное значение в общей задаче анализа.

Рассматриваемый в данной статье подход к математическому моделированию СМП соответствует мировой практике и базируется на использовании математической модели СМП (МС), представленной в виде нескольких стандартных линейных звеньев. Кроме того, в соответствии с существующим в АО «Корпорация «ВНИИЭМ» опытом в первом приближении могут быть приняты следующие допущения:

- на ротор воздействуют одновременно два РМП;
- применяется независимое управление по каналам;
- поперечные колебания ротора рассматриваются в одной плоскости.

В структурной схеме МС, показанной на рис. 1, в каждый канал управления (КУ) входят М основных функциональных устройств: датчиков положения ротора (МД); управления (МУ); исполнительного органа (МИО), включающая электромагниты с выходными усилителями; ротора (МР). Основными параметрами, характеризующими МС, являются следующие: x_p – отклонение ротора; U_d – сигналы датчиков; U_x, U_c – внешние сигналы перемещений и силы; U_y – сигналы управления усилителями; F_3 – результирующая электромагнитная сила, действующая на ротор.

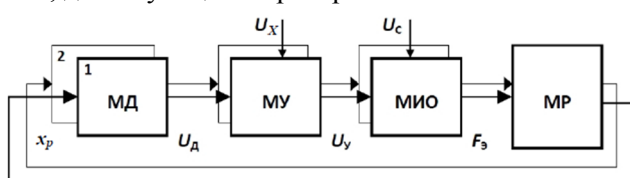


Рис. 1. Структурная схема МС

Основной задачей исследований МС является выбор способов и параметров управления СМП, удовлетворяющих требованиям устойчивости и качества управления. Оценка динамических свойств элементов и системы в целом проводится на основе сравнения переходных функций (ПФ) и частотных характеристик (ЧХ), полученных на рассмотренных ниже М элементов и МС в целом. Критериями сравнения для ПФ являются: характер переходного процесса, быстродействие, перерегулирование, частота колебаний ротора. Для ЧХ – соответствие характеристик стандартному виду; уровень колебаний ротора на критических частотах; запасы по фазе на характерных частотах.

Проектирование СМП является комплексной задачей, которая охватывает два взаимно связанных этапа:

1. Определение основных размеров и электро-механических характеристик электромагнитов, по которым в ряде публикаций [2, 3] изложены основные методы расчёта.

2. Выбор структуры и параметров системы управления электромагнитами, обеспечивающей требуемые динамические свойства.

Причём второй этап базируется на результатах, которые могут быть отражены в виде тяговых характеристик электромагнитов (ЭМ). В качестве примера рассмотрим виртуальную СМП, в которой масса ротора составляет около 1400 кг, скорость вращения достигает 6000 об/мин, для центрирования ротора применяются два восьмиполюсных РМП. Тяговые усилия, создаваемые каждым КУ РМП в характерных точках (рис. 2), составляют: $F_m=10,4$; $F=5,2$; $F_0=2,6$ кН при соответствующих токах $I_m=16$; $I=11,3$; $I_0=8$ А. Индуктивность и активное сопротивление обмоток составляют: $L_0=0,08$ Гн, $R=0,4$ Ом.

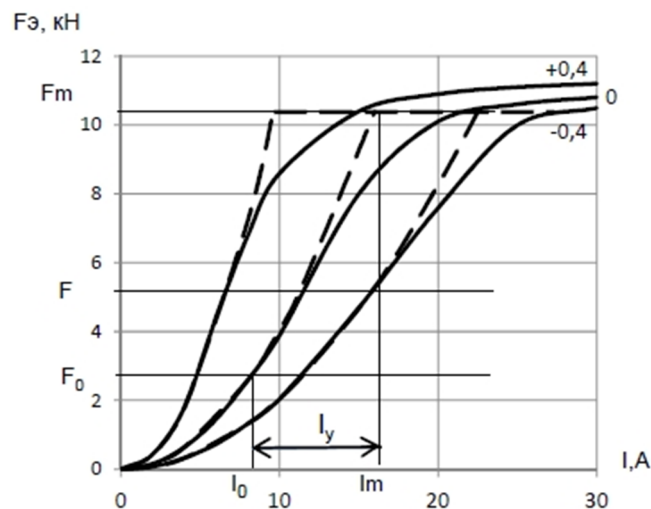


Рис. 2. Тяговые характеристики электромагнита

Свойства и параметры РМП в общем виде можно характеризовать уравнениями тягового усилия, имеющими в первом приближении следующий вид:

$$F_3 = \frac{\Psi^2}{2L_0 a}; \tag{1}$$

$$F_3 = \frac{L_0 I^2}{2a(1-x')^2},$$

где Ψ , I – потокосцепление и ток обмотки; L_0 – индуктивность при центральном положении ротора; a – зазор между статором и ротором, $x' = x_p/a$ – относительное отклонение ротора.

Расчётные тяговые характеристики РМП имеют сложную нелинейную зависимость усилия притяжения $F_{\text{э}}$ от тока I и перемещения ротора x' . При проектных расчётах обычно эти зависимости представляют в виде семейства кривых, показанных на рис. 2 сплошными линиями. Средняя кривая соответствует центральному положению ротора ($x' = 0$). Крайние кривые характеризуют усилия при отклонениях ротора в пределах зазоров в страховочных подшипниках ($x' = \pm 0,4$). Судя по этим кривым, максимальное значение тягового усилия F_m , которое может создавать РМП, в первом приближении при проведении моделирования можно считать постоянным. Для усилий в области ниже $0,7 F_m$ с достаточной степенью точности можно считать, что кривые соответствуют выражениям (1).

Если принять такую аппроксимацию тяговых характеристик ЭМ, кривые для которой на рис. 2 показаны пунктиром, то можно линеаризовать систему управления усилием по каждому КУ с использованием принципа суперпозиции и дифференциального управления каждым ЭМ.

При дифференциальной схеме включения диаметрально противоположных ЭМ каждого КУ РМП, как было показано в [4], управление осуществляется отдельно по сумме и разности токов смещения I_0 и управления I_y . Причём I_y включает постоянную I_- (длительно действующую) и переменную I_+ составляющие, т. е. $I_y = I_- + I_+$. В соответствии с принятой аппроксимацией тяговых характеристик и принципами линеаризации должны соблюдаться следующие ограничения:

$$|I_y| \leq I_0 \quad \text{и} \quad |F_y| \leq F_m.$$

Следовательно, при $I_y = I_0$ и $x' = 0$ получаем из (1) выражение для F_m в следующем виде:

$$F_m = 2L_0 \frac{I_0^2}{a} = 4F_0.$$

При анализе динамических процессов управления математическая модель ЭМ имеет важное значение. В исследованиях АО «Корпорация «ВНИИЭМ» этому вопросу посвящено несколько работ, включая отдельную научную статью [5], в которой изложены основные исходные положения.

Уравнение Кирхгофа для цепи электромагнита в сочетании с выражениями (1) для тягового усилия дают исходные уравнения в следующем виде:

$$\begin{aligned} U &= \frac{d\Psi}{dt} + L_1 \frac{dI}{dt} + IR; \\ F_{\text{э}} &= \frac{\Psi^2}{2aL_0}; \\ \Psi &= \frac{L_0 I}{(1-x')}, \end{aligned} \quad (2)$$

где U – напряжение, приложенное к обмотке; L_1 – индуктивность рассеяния; R – активное сопротивление.

В соответствии с исходными уравнениями (2) и с учётом физически существующих ограничений по перемещениям \bar{x} , усилиям \bar{F} и тока \bar{I} разработана структурная схема модели ЭМ (МЭМ), показанная на рис. 3.

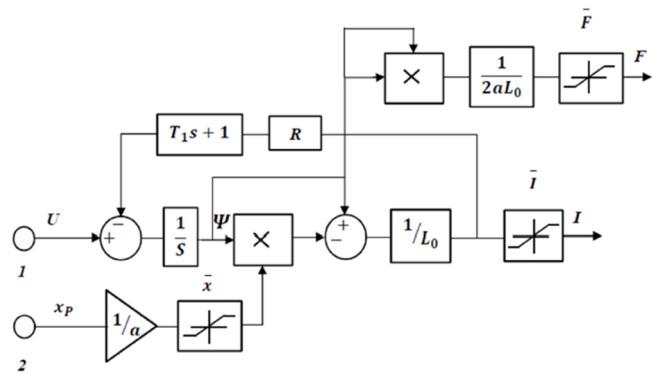


Рис. 3. Структурная схема модели электромагнита

В качестве примера рассмотрим применение разработанной МЭМ для анализа динамики модели форсированного ЭМ (МФЭМ) (рис. 4). В МФЭМ установлены параметры, соответствующие рассмотренному выше виртуальному ЭМ, тяговые характеристики которого показаны на рис. 2. В соответствии с существующими в АО «Корпорация «ВНИИЭМ» принципами управления СМП газоперекачивающих агрегатов для форсировки используется отрицательная обратная связь по току в обмотке с коэффициентом передачи $K_{\text{ос}} = 0,5$, причём коэффициент усиления в прямой цепи $K_y = 500$ с ограничением по напряжению питания $U_{\text{п}} = 200$ В. Во входной части схемы предусмотрена компенсация существующей зависимости тяговой характеристики ЭМ от перемещения ротора, как это принято в структуре управления, рассмотренной в ранее опубликованной статье [4].

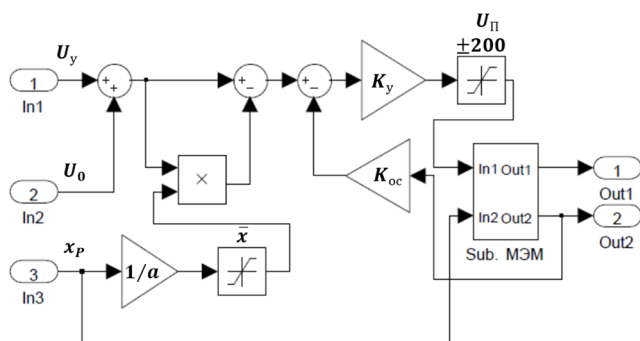


Рис. 4. Структурная схема модели форсированного ЭМ

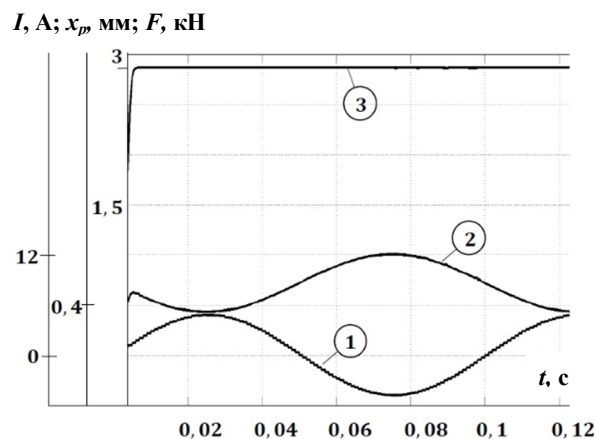


Рис. 5. Осциллограммы сигналов модели

Анализ процессов в этой модели показывает, что созданное ЭМ тяговое усилие инвариантно к перемещению ротора x_p . С целью подтверждения этого факта на вход МФЭМ одновременно подавались постоянный сигнал $U_0 = 4В$ и сигнал перемещения ротора $x_p = 0,4$ с частотой $f = 10$ Гц.

На рис. 5 показаны осциллограммы изменения положения ротора x_p (кривая 1), тока в обмотке I (кривая 2) и тягового усилия F (кривая 3). Поскольку перемещение ротора практически не влияет на величину усилия, то это свидетельствует об инвариантности данной структуры управления МФЭМ к перемещению ротора.

Обычно по каждому КУ РМП результирующее тяговое усилие, действующее на ротор, одновременно создают отдельные ЭМ данной оси. При совместном воздействии на ротор двух диаметрально противоположных ЭМ, управляемых по дифференциальной схеме, результирующее усилие F_p для КУ получается знакопеременным. Общая функциональная схема МИО КУ представляет собой результат сложения subsystem МФЭМ отдельных ЭМ. Полная схема МИО КУ для рассматриваемого виртуального РМП представлена на рис. 6.

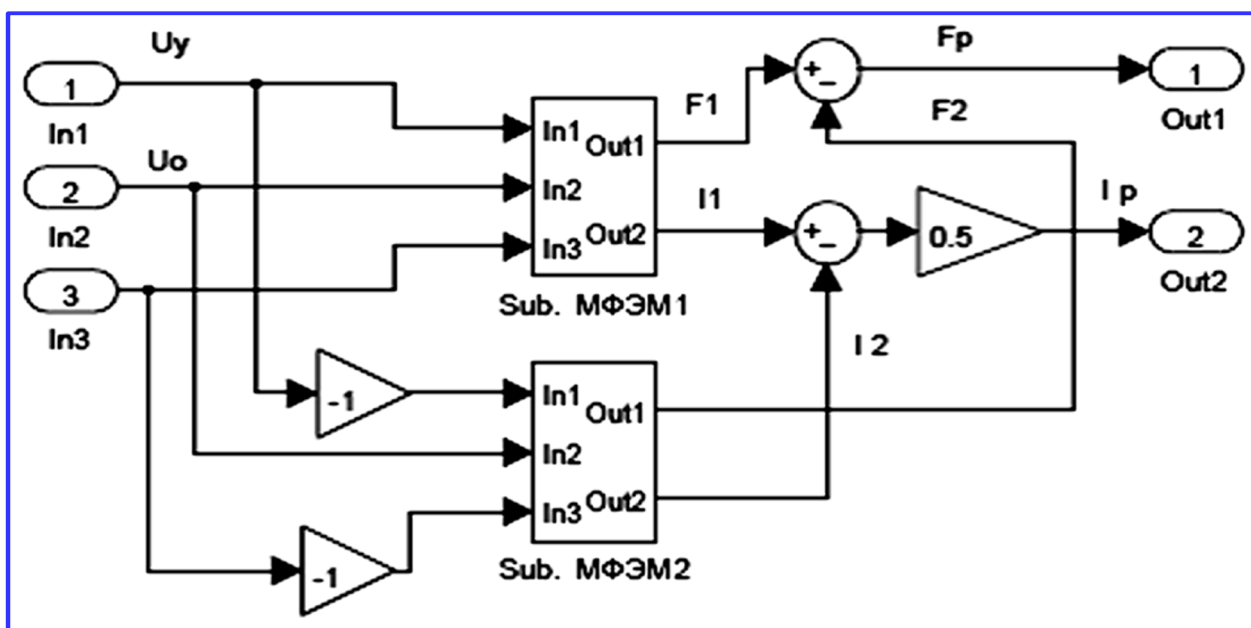


Рис. 6. Полная схема МИО КУ

Анализ динамических свойств этой МИО показывает, что в пределах небольших переменных возмущений свойства соответствуют традиционным линейным системам. За пределами линейной зоны работы, например в переходных режимах, когда действуют существующие в системе ограничения, свойства отличаются от закономерностей, характерных для линейных САУ. В качестве примера на рис. 7 и 8 для виртуального ЭМ представлены переходные характеристики (ПХ) изменения тягового усилия F при различных уровнях управляющего сигнала U_y : во-первых, для линейной зоны работы $U_y = 0,2$ и $0,4 B$; во-вторых, для больших значений, соответствующих F_m .

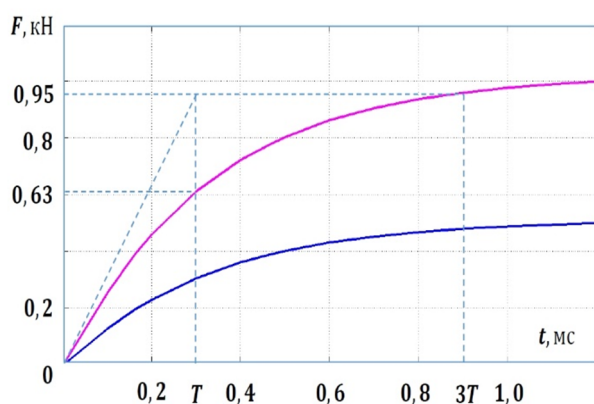


Рис. 7. ПХ усилия при работе в линейной зоне

Из сопоставления графиков этих процессов следует, что в линейной зоне работы усилителей характер изменения выходных величин МИО близок к экспоненциальному. Это соответствует апериодическому звену первого порядка.

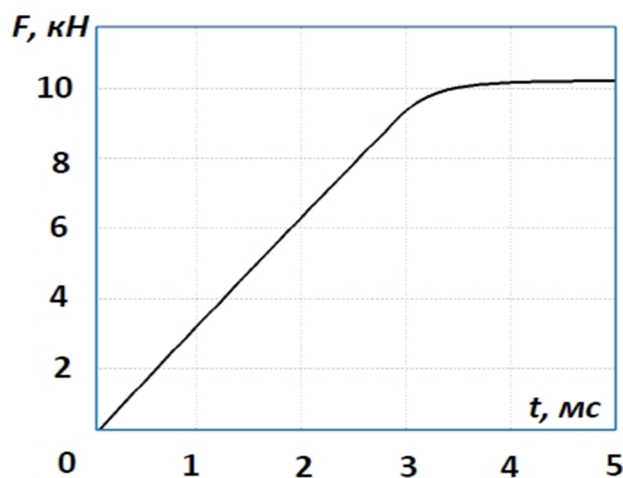


Рис. 8. ПХ усилия МИО при воздействии больших сигналов

Кроме того, на рис. 9 показаны частотные характеристики (ЧХ) результирующего управляющего тока в полной схеме МИО КУ. По характеру изменения эти ЧХ соответствуют апериодическому звену первого порядка с частотой среза 500 Гц.

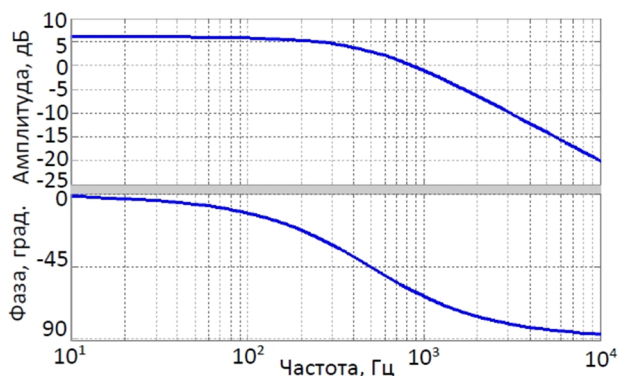


Рис. 9. ЧХ тока МИО КУ

На основании изложенного в работе [6], для удобства анализа динамических процессов СМП относительно громоздкую полную МИО КУ можно преобразовать в рабочую схему, показанную на рис. 10. Параметры звеньев этой схемы соответствуют характеристикам рассматриваемого РМП и аппаратуре управления с учётом следующих обозначений: $K_s=1/R$ — коэффициент передачи звена ЭМ; $T_s=L_0/R$ — постоянная времени звена ЭМ; $K_f=F_m/I_0$ — коэффициент преобразования результирующего тока в тяговое усилие КУ. В этой схеме создаётся знакопеременное тяговое усилие, эквивалентное результирующему усилию F_p , как в полной схеме. Кроме того, здесь представлены физически существующие ограничения по напряжению питания, максимальным токам и усилиям, которые могут оказывать существенное влияние на переходные процессы в СМП. Следует отметить, что ПХ для усилия, снятые на рабочей схеме МИО виртуального РМП, соответствуют графикам, показанным на рис. 7 и 8.

ЧХ для усилия, представленные для рабочей МИО на рис. 11, по характеру адекватны ЧХ (рис. 9) для тока полной модели МИО КУ, что свидетельствует о возможности применения для анализа рабочей схемы МИО КУ.

Однако при анализе динамики СМП следует учитывать, что в рабочей схеме по сравнению с полной схемой МИО КУ не учитываются составляющие тока, обеспечивающие линейризацию и инвариантность характеристик отдельных ЭМ.

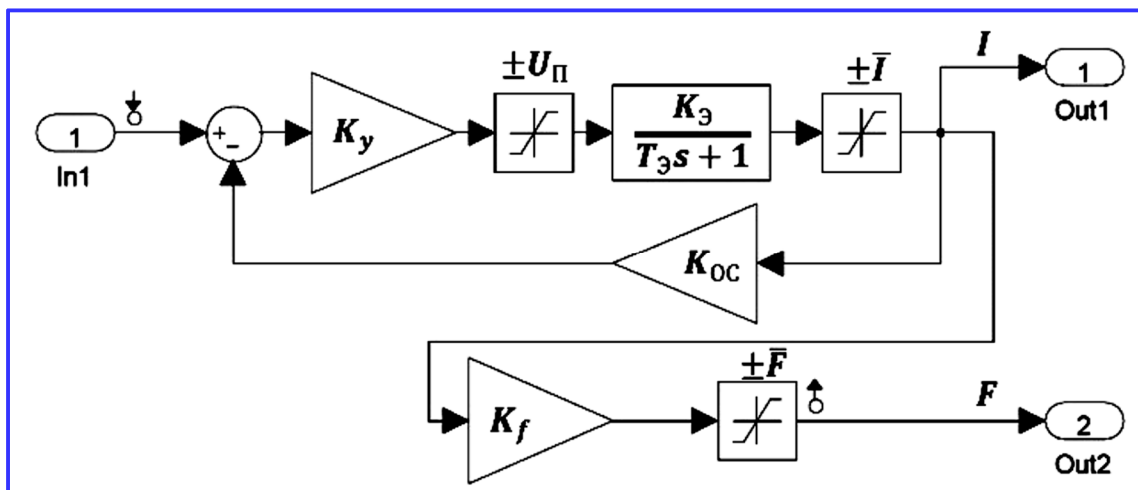


Рис. 10. Рабочая схема МИО КУ

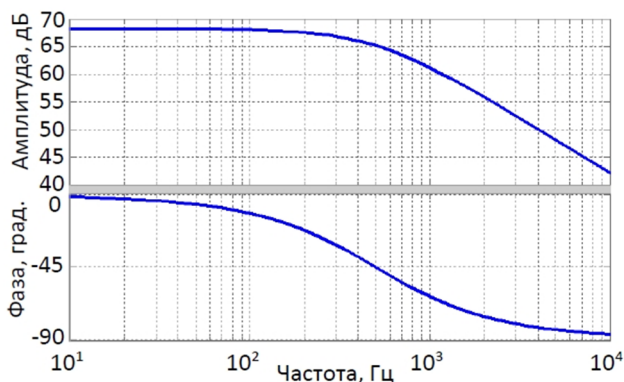


Рис. 11. ЧХ усиления для рабочей схемы МИО КУ

Обычно на первом этапе проектирования СМП для анализа динамических процессов при малых воздействиях в пределах линейной зоны работы можно воспользоваться МИО КУ в виде апериодического звена первого порядка с передаточной функцией вида:

$$W_{ио}(s) = \frac{k_{ио}}{T_{ио}s + 1},$$

где $k_{ио}$ – коэффициент передачи; $T_{ио}$ – постоянная времени.

В первом приближении из рабочей схемы МИО КУ получаем:

$$k_{ио} = \frac{k_f}{k_{ос}};$$

$$T_{ио} = \frac{T_э}{k_y k_{ос} k_э}.$$

Таким образом, для анализа и исследования динамических процессов в СМП, связанных с применением традиционных методов для линейных САУ, можно воспользоваться расчётной схемой МИО КУ или аналогичной моделью в виде апериодического звена первого порядка.

Для широкого класса роторных машин с СМП, разработанных в АО «Корпорация «ВНИИЭМ», модель датчиков перемещения ротора (МД) принято представлять простым апериодическим звеном с полосой пропускания до 5 кГц. Это соответствует современному уровню преобразования и фильтрации входных сигналов СМП. Выражение для передаточной функции датчиков имеет следующий вид:

$$W_d(s) = \frac{k_d}{T_d s + 1},$$

где $k_d = 2 \cdot 10^3$ – коэффициент передачи звена датчиков, В/м; T_d – постоянная времени преобразования и фильтрации ($T_d \cong 3 \cdot 10^{-5}$ с).

Динамика процессов управления СМП в значительной мере определяется законом управления, реализуемым в относительно самостоятельном устройстве (регуляторе). В соответствии с общими подходами, изложенными в теории автоматического управления, наиболее распространённым способом управления является применение ПИД-регулятора, реализующего пропорционально интегрально-дифференциальный закон управления. Базируясь на рассмотрении движения ротора в СМП по аналогии с механическим движением массы под воздействием упруго-вязких сил, как это сделано в работе [4] по обоснованию и выбору структуры

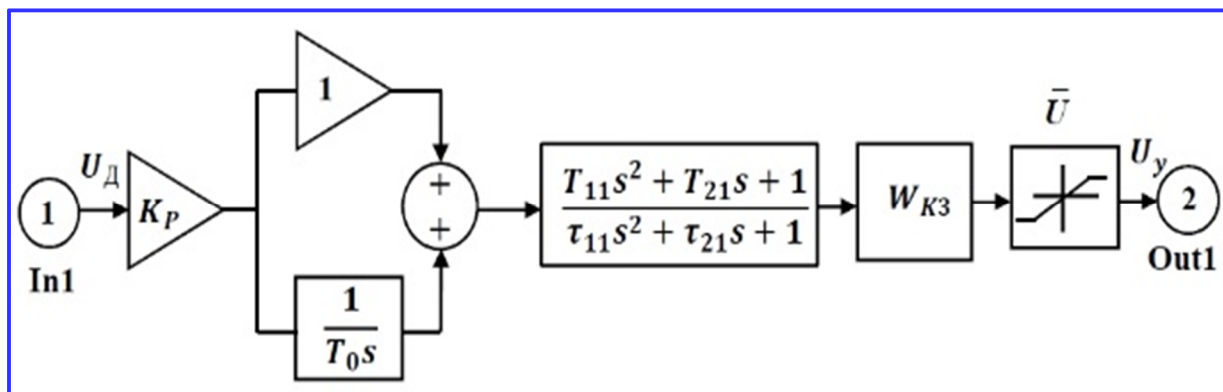


Рис. 12. Структурная схема МУ

ПИД-регулятора, можно передаточную функцию регулятора $W_y(s)$ записать в следующем виде:

$$W_y(s) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_0 s}\right) \frac{(1 + T_1 s)(1 + T_2 s)}{(1 + \tau_1 s)(1 + \tau_2 s)} W_{K3}(s),$$

где k_p – коэффициент передачи регулятора; T_0 , T_1, T_2 – постоянные времени интегрирования и демпфирования; τ_1, τ_2 – постоянные времени балластных звеньев; $W_{K3}(s)$ – передаточная функция корректирующих звеньев и заградительных фильтров. Представленная здесь форма записи передаточной функции регулятора в наибольшей степени подходит для раздельной оценки влияния интегральной, пропорциональной и дифференциальной составляющих, а также для предварительного выбора этих параметров в соответствии с рекомендациями, изложенными ранее в [4]. Если для СМП выбранного виртуального ротора принять при жёсткости опор $C = 15$ Н/мкм частоту первой формы около $\omega_1 = 150$ 1/с, а второй $\omega_2 = 300$ 1/с, то, соответственно, значения параметров для проведения моделирования можно получить в следующем виде:

$$\begin{aligned} T_1 &\leq 1,73 / \omega_1 = 12 \cdot 10^{-3} \text{ с;} \\ \tau_1 &\leq 0,58 / \omega_1 = 4 \cdot 10^{-3} \text{ с;} \\ T_2 &\leq 1,73 / \omega_2 = 6 \cdot 10^{-3} \text{ с;} \\ \tau_2 &\leq 0,58 / \omega_2 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ с;} \\ T_0 &\geq 8 \cdot T_1 = 0,1 \text{ с.} \end{aligned}$$

Переходя к форме записи передаточной функции ПД звена в виде полиномов и принимая пред-

варительно $W_{K3}(s) = 1$, получим выражение для $W_y(s)$ в следующем виде:

$$W_y(s) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_0 s}\right) \frac{T_{11} s^2 + T_{21} s + 1}{\tau_{11} s^2 + \tau_{21} s + 1},$$

где постоянные времени $T_{11} = T_1 T_2$; $T_{21} = T_1 + T_2$, а $\tau_{11} = \tau_1 \tau_2$; $\tau_{21} = \tau_1 + \tau_2$.

В результате для моделирования динамических процессов в СМП на первом этапе проектирования можно воспользоваться структурной схемой МУ, показанной на рис. 12. Коэффициент передачи принят $k_p = 2,34$ из условия соответствия суммарного коэффициента передачи КУ величине выбранной жёсткости РМП – 15 Н/мкм с учётом $k_d = 2 \cdot 10^3$ В/м. ЧХ для выбранной структуры МУ представлена на рис. 13. Из этих графиков видно, что нулевая фаза соответствует частоте около 4,5 Гц, а максимальная опережающая фаза около 45 град – частоте 40 Гц. Это соответствует условиям, принятым при выборе параметров регулятора и обеспечивает необходимое фазовое опережение до 30 град на частотах до 100 Гц (рабочий диапазон) при соответствующем увеличении жёсткости почти в 6 раз.

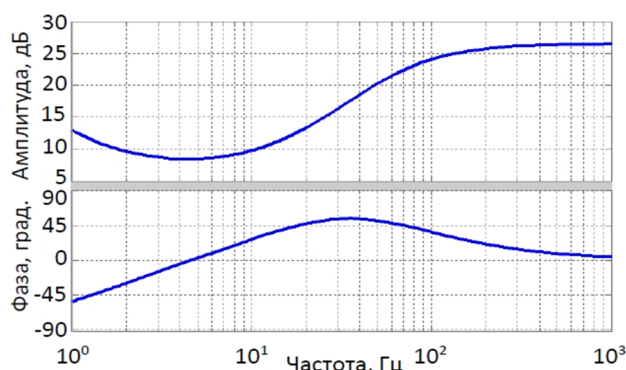


Рис. 13. Общий вид ЧХ МУ

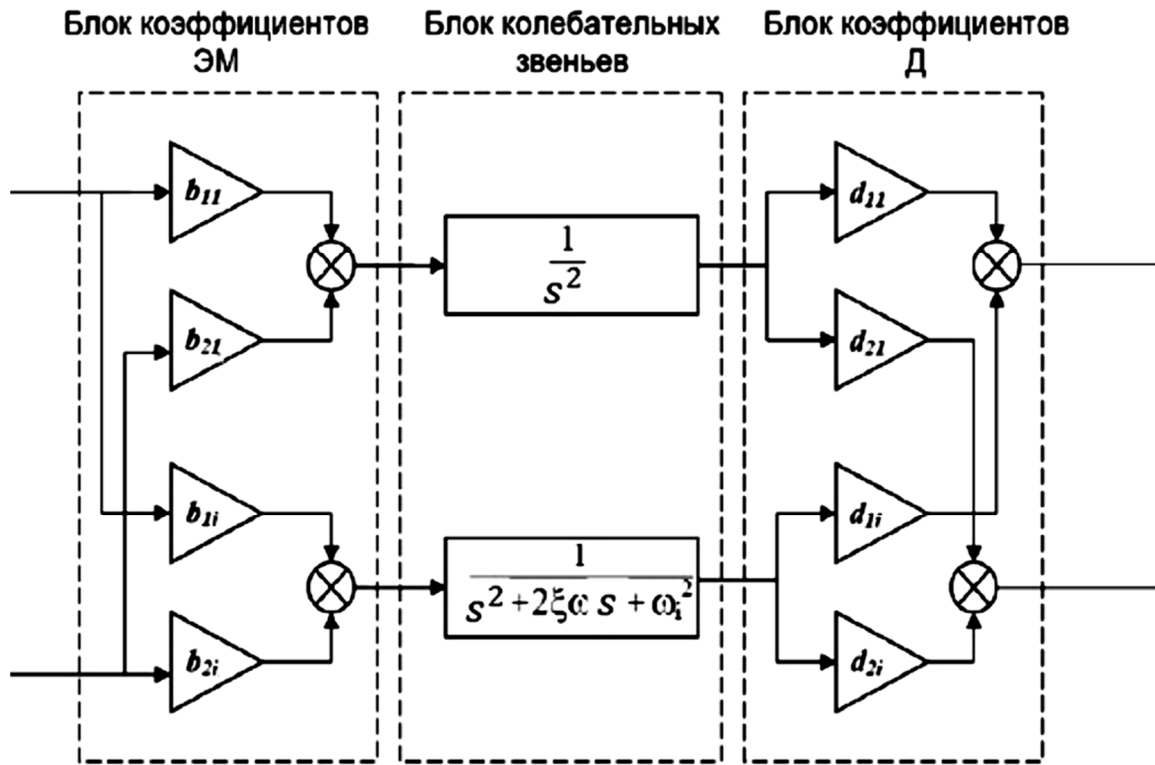


Рис. 14. Общая схема МР

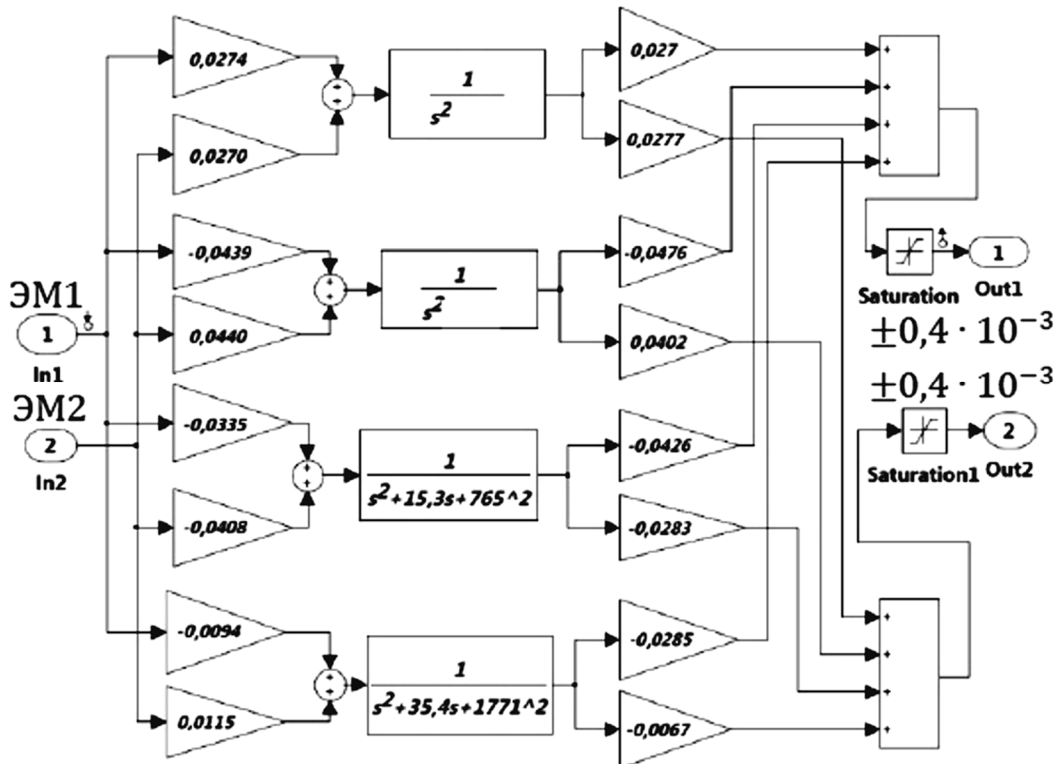


Рис. 15. Расчётная схема МР

Расчёту динамических свойств сложных роторных систем применительно к устройствам с СМП посвящены специальные работы отечественных и зарубежных авторов, в том числе одна из публикаций сотрудников АО «Корпорация «ВНИИЭМ» [7]. В соответствии с существующими подходами, рассматривается движение ротора с учётом гибкости его конструкции и жёсткости магнитных опор. На основе модального анализа определяются основные формы колебаний и коэффициенты влияния, которые используются для построения расчётной МР. В качестве примера на рис. 14 представлена общая схема МР, в которой в верхней части находятся коэффициенты влияния и интегрирующие звенья, характерные для колебаний жёсткого ротора, а в нижней части – для гибкого ротора. Причём жёсткость в колебательных звеньях соответствует выбранной жёсткости опор. Для типового ротора, близкого по свойствам к роторам компрессоров газоперекачивающих агрегатов, значения частот колебаний и коэффициентов влияния при жёсткости опор 15 Н/мкм и внутреннем коэффициенте демпфирования ротора $\xi=0,01$ представлены в табл. 1. Здесь, с целью упрощения анализа, приведены данные только для первых четырёх форм колебаний: 1 и 2 формы для жёсткого ротора, 3 и 4 изгибные формы с учётом свойств гибкого ротора.

Таблица 1

№ формы	ω_r , 1/с	$2\xi\omega_r$, 1/с	b_{1i}	b_{2i}	d_{1i}	d_{2i}
1	154	0	0,0274	0,0270	0,0270	0,0277
2	241	0	-0,0439	0,0440	-0,0476	0,402
3	765	15,3	-0,0335	-0,0408	-0,0426	-0,0283
4	1771	35,4	-0,0094	-0,0115	-0,0285	-0,0067

Расчётная схема МР, соответствующая данным табл. 1, показана на рис. 15. Схема имеет два входа, на которые подаются управляющие усилия, создаваемые ЭМ КУ. Существующие ограничения перемещений ротора в страховочных подшипниках ротора имитируются соответствующими звеньями, включёнными на выходах схемы МР. Из ЧХ МР, показанных на рис. 16, видно, что на частотах около 110 и 295 Гц существуют резонансы, соответствующие 3 и 4 форме упругих колебаний ротора.

Обобщая представленные выше М отдельных устройств, получаем расчётную схему МС, которая может быть применена для определения ЧХ и ПФ на этапах проектирования и экспериментального исследования СМП. В этой схеме МС, показанной

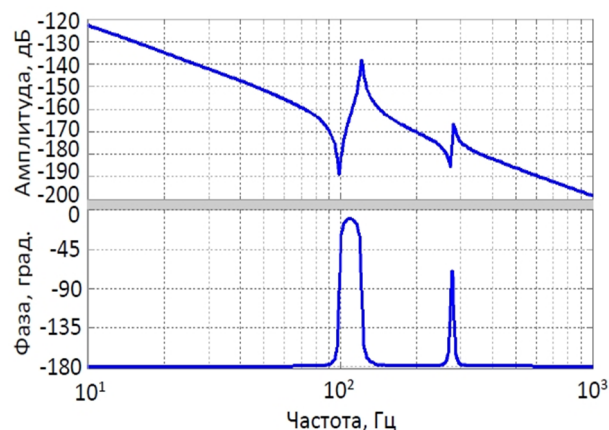


Рис. 16. Общий вид ЧХ МР

на рис. 17, входящие в её состав отдельные устройства представлены в виде субблоков Sub, соответствующих М.

Каждый из двух КУ соответствует своему РМП, воздействующему на общий ротор в виде субблока Sub МР. При исследовании динамических процессов в СМП для определения ЧХ и ПФ в представленной схеме предусмотрены точки, которые могут быть использованы для приложения возмущающих воздействий и имитационных сигналов. Точки подачи входных имитационных и для снятия выходных сигналов при определении ЧХ и ПФ отмечены на рис. 17 соответствующими маркерами.

Следует отметить, что способы имитации воздействий при моделировании аналогичны приемам, используемым на практике при экспериментальных исследованиях машин с СМП в АО «Корпорация «ВНИИЭМ». При таком подходе обеспечивается адекватность условий определения расчётных и экспериментальных характеристик. В результате упрощается анализ полученных данных.

В качестве примера рассмотрим ЧХ и ПФ, полученный на данной МС для СМП виртуального ротора с параметрами, рассмотренными выше, при моделировании в программе Matlab Simulink.

Для оценки динамических свойств и качества управления СМП в широком диапазоне частот, в том числе за пределами рабочих скоростей вращения, можно воспользоваться ЧХ поперечных колебаний ротора, показанной на рис. 18. Из этой характеристики видно, что в рабочем диапазоне скоростей вращения до частоты 100 Гц существуют подёмы на критических частотах 22 и 80 Гц, соответствующих симметричным и косым формам колебаний ротора.

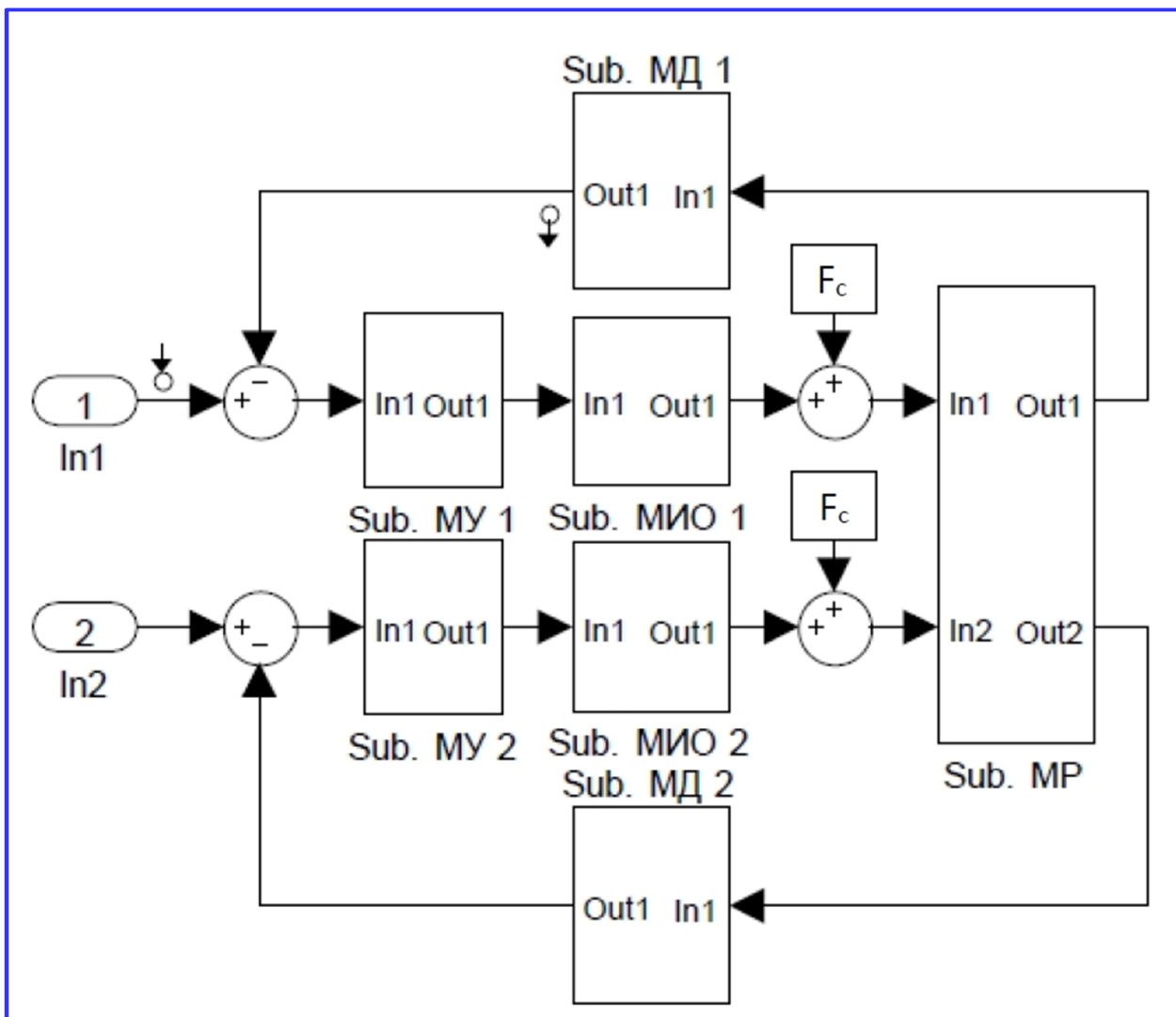


Рис. 17. Расчётная схема МС

Уровень колебаний на этих частотах соответственно составляет 1,56 и $-0,5$ Дб, что свидетельствует о приемлемом качестве управления рассмотренной СМП в рабочем диапазоне скоростей. Значительное увеличение уровня колебаний за пределами рабочего диапазона скоростей до 9,35 Дб отмечается на критической частоте 130 Гц, соответствующей первой изгибной форме колебаний ротора. Кроме того, следует обратить внимание на резонансные колебания на частоте 290 Гц, которая соответствует второй изгибной форме. Для удобства сравнения отмеченные данные сведены в табл. 2. Способы снижения уровня колебаний ротора на упругих частотах рассмотрены в отдельной публикации [8] по вопросам выбора типа корректирующих звеньев и заградительных фильтров.

Оценка устойчивости и качества динамических процессов СМП часто проводится по характеру ПФ (функция Step Response в программе Simulink),

которая отражает степень затухания переходного процесса и уровень демпфирования колебаний ротора на критических частотах.

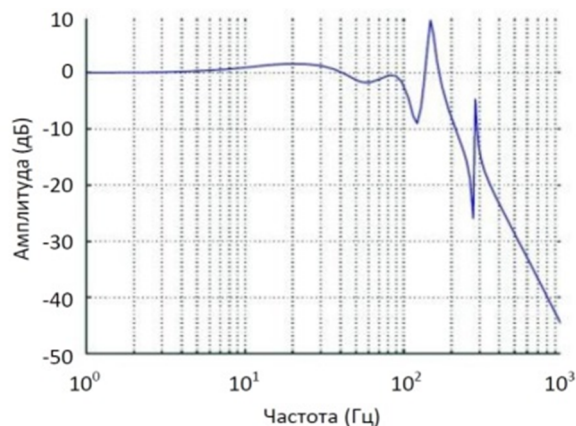


Рис. 18. Частотная характеристика МС

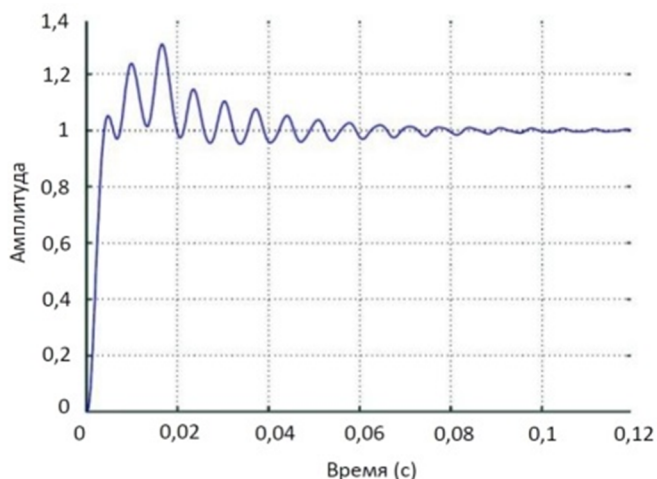


Рис. 19. Переходная функция МС

Таблица 2

Частота колебаний ротора (форма, Гц)	Уровень колебаний, дБ
Симметричная, 22	1,56
Косая, 80	-0,5
Упругая 1, 130	9,35
Упругая 2, 290	-4,7

В качестве примера по характеру ПФ, показанной на рис. 19, можно судить о достаточном запасе по устойчивости, так как перерегулирование не превышает 30 %. Однако при движении ротора заметны слабо затухающие колебания ротора с частотой около 130 Гц, которая характерна для первой упругой формы колебаний ротора. Такой характер переходного процесса свидетельствует о хороших демпфирующих свойствах СМП в рабочем диапазоне скоростей вращения ротора (до 100 Гц) и о малом запасе устойчивости на первой упругой частоте. В целом процесс затухает, и время переходного процесса составляет 0,12 с.

Таким образом, разработаны, рассмотрены и апробированы основные положения по выбору структуры и параметров математической модели СМП, которую можно использовать для сравнительного анализа динамических свойств различных проектных вариантов.

Выводы

1. Методы проектирования СМП, применяемые в АО «Корпорация «ВНИИЭМ», базируются на разработанных специальных М отдельных устройств и системы управления в целом с использованием стандартной компьютерной программы Matlab Simulink.

2. При сравнении различных проектных вариантов СМП рассматриваются ЧХ и ПФ, которые характеризуют основные динамические свойства и применяются как при проектировании, так и при экспериментальных исследованиях СМП.

3. Показана возможность идентификации МИО КУ в виде структуры, состоящей из апериодического звена первого порядка с учётом звеньев ограничения по напряжению питания усилителя и тягового усилия электромагнита.

4. Представленные в качестве примера результаты исследования для виртуальной СМП свидетельствуют о корректности принятых допущений и достаточной точности разработанных М для проектирования.

Литература

- Макриденко Л. А., Сарычев А. П., Верещагин В. П., Рогоза А. В. Состояние и перспективы развития электромагнитных подшипников в ФГУП «НПП ВНИИЭМ» / Л. А. Макриденко и др. // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – 2011. – Т. 120. – № 1. – С. 3 – 12.
- Магнитный подвес роторов электрических машин и механизмов // Труды ВНИИЭМ. – М. : НПП ВНИИЭМ, 1989. – Т. 89. – 135 с.
- Сарычев А. П. Разработка электромагнитных подшипников для серии компрессоров газоперекачивающих агрегатов / А. П. Сарычев // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – 2009. – Т. 110. – № 3. – С. 3 – 10.
- Богданов Д. Н., Верещагин В. П. Структура системы управления электромагнитными подшипниками / Д. Н. Богданов, В. П. Верещагин // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – 2010. – Т. 114. – № 1. – С. 9 – 14.
- Верещагин В. П., Клабуков В. А. Математическая модель магнитного подшипника / В. П. Верещагин, В. А. Клабуков // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М. : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2009. – Т. 112. – С. 17 – 22.
- Верещагин В. П., Рогоза А. В. Моделирование процессов управления электромагнитами в системах магнитного подвеса / В. П. Верещагин, А. В. Рогоза // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – М. : ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2013. – Т. 136. – С. 3 – 8.
- Сарычев А. П., Руковицын И. Г. Математическая модель ротора для анализа управления магнитными подшипниками / А. П. Сарычев, И. Г. Руковицын // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М. : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2008. – Т. 107. – С. 11 – 15.
- Верещагин В. П., Михаленко А. А., Рогоза А. В., Руковицын И. Г., Спиринов А. В. Исследование влияния упругих свойств ротора на динамические процессы системы магнитного подвеса / В. П. Верещагин и др. // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2015. – Т. 147. – № 4. – С. 3 – 9.

Поступила в редакцию 16.08.2016.

*Леонид Алексеевич Макриденко, д-р техн. наук, генеральный директор, т. (495) 365-56-10.
Алексей Петрович Сарычев, д-р техн. наук, 1-й зам. генерального директора, т. (495) 366-56-29.
Азим Седрединович Абдурагимов, зам. генерального директора, т. (495) 365-25-45.
Владимир Петрович Верещачин, д-р техн. наук, главный научн. сотрудник, т. (495) 365-50-73.
Александр Валерьевич Рогоза, канд. техн. наук, начальник НИК, т. (495) 366-04-79.
E-mail: vniiem@vniiem.ru.
(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).*

VNIIEM METHODS for ELECTROMAGNETIC BEARING DESIGN

L.A. Makridenko, A.P. Sarychev, A.S. Abduragimov, V.P. Vereshchagin, A.V. Rogoza

The article reviews main principles and methods for evaluation of dynamic properties of electromagnetic bearing systems used in compressors of gas-compressor plants. It presents mathematical models used for analysis of dynamic processes of individual components and of the bearing control system as the whole. Stability and control quality provided during designing and research of electromagnetic bearings have been evaluated according to frequency-response characteristics and transient functions obtained on models for specified control parameter values. This approach allows to select a design version which will meet the specified requirements to the fullest extent. As an illustration, frequency-response and transient characteristics of electromagnetic bearing system for virtual rotor with parameters, nearly matching the parameters of one of the designed compressors, have been considered. According to demonstrated dynamic properties, stability reserve and control quality of an electromagnetic bearing system can be evaluated. Additionally the obtained results demonstrate that it is quite possible to transform a complex electromagnet control system to an easy-to-analyse first-order lag block. It allows to facilitate research of electromagnetic bearing system dynamics and to use for it a standard Matlab Simulink program.

Key words: electromagnetic bearings, bearing control system, mathematical models, dynamic processes, frequency-response characteristics, transient functions, comparison criteria, control stability and quality.

List of References

1. Makridenko L. A., Sarychev A. P., Vereshchagin V. P., Rogoza A. V., State and development prospects for electromagnetic bearings in FSUE «SPE VNIIEM» / L.A. Makridenko et al. // Issues of Electromechanics. VNIIEM Works. – M. : SPE VNIIEM. – 2011. – Vol. 120. – No. 1. – Pp. 3 – 12.
2. Magnetic bearings of rotors for electric vehicles and machinery // VNIIEM Works. – M. : SPE VNIIEM, 1989. – Vol. 89. – 135 pages.
3. Sarychev A. P. Designing of electromagnetic bearings for compressors of gas-compressor plants series / A. P. Sarychev // Issues of Electromechanics. VNIIEM Works. – 2009. – Vol. 110. – No. 3. – Pp. 3 – 10.
4. Bogdanov D. N., Vereshchagin V. P. Configuration of electromagnetic bearing control system / D. N. Bogdanov, V. P. Vereshchagin // Issues of Electromechanics. SPE VNIIEM Works. – 2010. – Vol. 114. – No. 1. – Pp. 9 – 14.
5. Vereshchagin V. P., Klabukov V. A. Mathematical model for magnetic bearings / V. P. Vereshchagin, V. A. Klabukov // Issues of Electromechanics. SPE VNIIEM Works. – M. : FSUE «SPE VNIIEM», 2009. – Vol. 112. – Pp. 17 – 22.
6. Vereshchagin V. P., Rogoza A. V. Modeling of control processes in magnetic bearing system electromagnets / V. P. Vereshchagin, A. V. Rogoza // Issues of Electromechanics. VNIIEM Works. – M. : VNIIEM Corporation JSC, 2013. – Vol. 136. – Pp. 3 – 8.
7. Sarychev A. P., Rukovitsyn I. G. Rotor mathematical model for analysis of magnetic bearing control / A. P. Sarychev, I. G. Rukovitsyn // Issues of Electromechanics. SPE VNIIEM Works. – M. : FSUE «SPE VNIIEM», 2008. – Vol. 107. – Pp. 11 – 15.
8. Vereshchagin V. P., Michalenko A. A., Rogoza A.V., Rukovitsyn I.G., Spirin A.V., Research of elastic characteristics effects on dynamic processes in magnetic bearing systems / V. P. Vereshchagin et al. // Issues of Electromechanics. VNIIEM Works. – 2015. – Vol. 147. – No. 4. – Pp. 3 – 9.

*Leonid Alekseevich Makridenko, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Director General, tel. (495) 365-56-10.
Aleksey Petrovich Sarychev, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), First Deputy Director General,
tel. (495) 366-56-29.
Azim Sedredinovich Abduragimov, Deputy Director General, tel. (495) 365-25-45.
Vlaimir Petrovich Vereshchagin, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Chief Researcher, tel. (495) 365-50-73.
Aleksandr Valerievich Rogoza, Candidate of Technical Sciences (Ph .D.), Head of SPC, tel. (495) 366-04-79.
E-mail: vniiem@vniiem.ru.
(JC «VNIIEM Corporation»).*