

АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СИСТЕМЫ МАГНИТНОГО ПОДВЕСА

В.П. Верещагин, А.А. Михаленко, А.В. Рогоза,
И.Г. Руковицын, Т.Н. Савинова, А.В. Спирин
(ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ»)

Рассмотрены математические модели отдельных составных устройств и системы магнитных подвесов в целом, которые могут быть использованы для анализа их динамических свойств. Показана возможность представления сложного исполнительного органа, состоящего из электромагнита и импульсного выходного усилителя, в виде простого апериодического звена. В качестве примера определены переходные и частотные характеристики для виртуальной системы.

Ключевые слова: система магнитного подвеса, моделирование, переходные и частотные характеристики.

Система магнитного подвеса (СМП) осуществляет стабилизацию положения ротора в центре относительно неподвижного статора машины и в соответствии с существующей классификацией [1] является замкнутой системой автоматического управления. В основе принципов построения СМП и исследований закономерностей протекающих в ней процессов обычно применяются стандартные методы теории автоматического управления. Вместе с тем ряд вопросов анализа и синтеза СМП на практике можно решить с использованием специальных моделей и приёмов, которые учитывают специфику управления СМП.

Целью данной статьи является рассмотрение математических моделей элементов и СМП в целом, которые применяются при разработке и исследованиях СМП роторных машин в ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ».

Наиболее распространённое применение находят СМП для двухопорных роторных машин, в которых используются два радиальных магнитных подшипника (РМП) и один осевой (ОМП). РМП обеспечивают стабилизацию положения ротора по поперечным осям с соответствующих сторон ротора. В каждом РМП объединено управление по двум поперечным осям ротора. Однако связями в общей магнитной системе РМП, как отмечалось в предшествующих публикациях [2, 3], в первом приближении можно пренебречь.

В большинстве случаев для пространственной стабилизации ротора применяется раздельное управление каналами СМП для разных степеней свободы движения ротора. В результате на общий ротор воздействуют одновременно пять каналов управления. При анализе поперечных колебаний ротора в некоторых режимах, например, при невращающемся роторе можно ограничиться только

двумя каналами РМП, расположенными в одной продольной плоскости с разных концов ротора.

Для исследования динамики машин с СМП обычно используют математические модели (М) устройств, входящих в замкнутую систему управления положением ротора.

Адекватность описания в М физических процессов, происходящих в реальных устройствах, может оказывать существенное влияние на точность получаемых результатов. 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 отдельных устройств имеет важное значение в общей задаче анализа.

Существующий в ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ» подход к моделированию СМП соответствует мировой практике и свидетельствует о том, что математическая модель СМП (МС) может быть представлена в виде нескольких стандартных линейных звеньев. В структурной схеме МС, показанной на рис. 1, в каждом канале управления (КУ) представлены М основных функциональных устройств.

Передаточная функция модели датчиков перемещений ротора (МД) может быть представлена простым апериодическим звеном с полосой пропускания до 5 кГц, соответствующей современному уровню преобразования и фильтрации входных сигналов СМП.

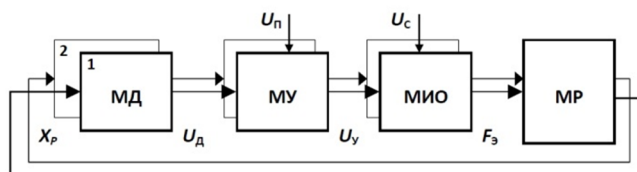


Рис. 1. Структурная схема МС

Выражение для передаточной функции датчиков $W(s)_д$ в этом случае имеет следующий вид:

$$W(s)_д = \frac{K_д}{1 + T_д s},$$

где $K_д = 2 \cdot 10^3$ – коэффициент передачи звена датчиков (В/м); $T_д$ – постоянная времени преобразований и фильтрации ($T_д \approx 3 \cdot 10^{-5}$ с).

Модель устройств управления (МУ), преобразующая сигнал датчиков $U_д$ в выходной сигнал U_y для управления выходным усилителем (ВУ), включает звенья ПИД-регулятора, фильтры, а также корректирующие звенья, обеспечивающие необходимые динамические свойства СМП.

Модель исполнительного органа СМП (МИО), преобразующая U_y в силу электромагнита F_M , воздействующую на ротор со стороны каждого ЭМ данного КУ, представляет собой комплексное электромеханическое устройство, объединяющее ВУ с электромагнитом (ЭМ).

Поскольку непосредственное измерение усилия, созданного ЭМ бесконтактным способом, практически затруднено, то решение задачи управления исполнительным органом (ИО) осуществляется с использованием доступных для измерения параметров (тока или напряжения на катушках).

Задача управления ЭМ рассмотрена отдельно в предыдущих публикациях [4 – 6], где показано, что это сложное устройство, при определенном малом уровне сигналов управления, можно моделировать линейным апериодическим звеном. В переходных режимах при более широком диапазоне изменения управляющих сигналов возникает необходимость в уточнении этих допущений.

Ротор, как объект управления в СМП, преобразует усилия, создаваемые ЭМ КУ, в соответствующие перемещения по данным осям. Модель ротора (МР) в общем случае должна учитывать его упругие свойства, которые оказывают существенное влияние на точность и устойчивость СМП.

Общая задача управления СМП заключается в обеспечении соответствия между входным сигналом X_p и выходным F_3 , которое удовлетворяет требованиям по уровню колебаний ротора при воздействии на него заданных возмущений. Для этой цели в МС предусмотрены имитационные входные сигналы U_n и U_c , позволяющие оценить влияние возмущающих факторов, соответственно, по перемещению и силе.

В качестве критериев для оценки устойчивости и качества управления СМП, в соответствии с существующими в теории автоматического управления подходами [1], можно принять переходные (ПХ) и частотные (ЧХ) характеристики. При этом исходными являются характеристики, полученные в результате математического моделирования СМП. Сравнение их с данными экспериментальных исследований позволяет определить направление и величину необходимых коррекций параметров СМП.

Анализ динамических свойств СМП осуществляется в рамках двух этапов, которые фактически используются при разработке СМП: определение характеристик для разомкнутой (РС) и замкнутой системы (ЗС). Некоторые подходы к решению этой задачи отражены в данной статье.

Рассмотрим общие подходы к определению структуры и параметров МС, которая может быть реализована в одной из стандартных компьютерных программ, например, MatLAB Simulink.

Остановимся более подробно на выборе структуры и параметров для МС, которую можно в первом приближении сформировать из стандартных звеньев на основе допущений, рассмотренных ниже для каждой М.

В разработках ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ» для роторных машин с СМП обычно применяется дифференциальная схема управления диаметрально расположенными ЭМ каждого КУ. Как было показано в предыдущих публикациях [4 – 6], такая система форсированного управления ЭМ, несмотря на существующие нелинейности тяговых характеристик и большую постоянную времени ЭМ, при небольших значениях переменных сигналов U_y по сравнению с постоянным значением U_{y0} , может быть представлена апериодическим звеном первого порядка. Передаточная функция такого звена с учётом коэффициентов передачи МД и МУ определяет динамическую жёсткость СМП и имеет следующий вид:

$$W(s)_{ио} = \frac{K_{ио}}{1 + T_{ио} s},$$

где $K_{ио}$ – суммарный коэффициент передачи ИО; $T_{ио}$ – постоянная времени форсированного ИО.

Учитывая существующие ограничения по уровню максимальных значений токов I_M и напряжения питания ЭМ U_n , а также усилий F_M , создаваемых ЭМ, целесообразно структуру МИО преобразовать к виду, удобному для моделирования и представ-

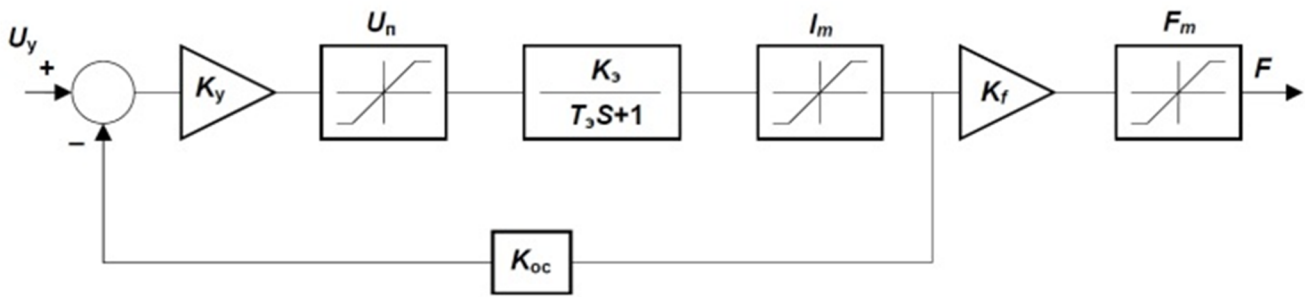


Рис. 2. Общая структурная схема МИО

ленному в предыдущей работе [4], но доработанному с учётом дифференциального управления двумя диаметрально противоположными ЭМ одного КУ.

Структурная схема МИО в общем виде для одного КУ, показанная на рис. 2, отражает процессы преобразования управляющего сигнала U_y в усилие F , воздействующее на ротор со стороны ЭМ данного КУ. Левая часть схемы соответствует форсированному ЭМ, управляемому от ИВУ, а правая – процессам преобразования тока возбуждения катушек ЭМ в тяговое усилие, воздействующее на ротор. Исходными при определении параметров МИО являются тяговые характеристики ЭМ.

Тяговые характеристики ЭМ в общем случае представляют собой сложную нелинейную зависимость усилия притяжения F_3 от тока I в катушке возбуждения и от перемещения ротора y' . При проектных расчётах ЭМ обычно эти зависимости представляют в виде семейства кривых, показанных на рис. 3 сплошными линиями для РМП виртуального компрессора газоперекачивающего агрегата. Красная кривая соответствует центральному положению ротора ($y'=0$). Фиолетовая и оранжевая кривые характеризуют усилия при $y'=+0,4$ и $-0,4$ соответственно. Судя по этим кривым, максимальное значение тягового усилия F_m , которое предельно может создавать ЭМ, в первом приближении, можно принять постоянным. Для усилий в области значений ниже $0,7 F_m$ с достаточной степенью точности кривые соответствуют выражению

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

где L_0 – индуктивность ЭМ при центральном положении ротора; a – зазор между ротором и статором.

Если принять в первом приближении такую аппроксимацию тяговых характеристик ЭМ, кривые

для которой показаны на рис. 3 пунктиром, то можно в целом линеаризовать систему управления усилием по каждому каналу (КУ) по принципу суперпозиции.

При дифференциальной схеме управления диаметрально противоположными ЭМ каждого КУ РМП, как показано в [6], осуществляется раздельно 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 принципами линеаризации и принятой аппроксимацией тяговых характеристик должны соблюдаться следующие соотношения:

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

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

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

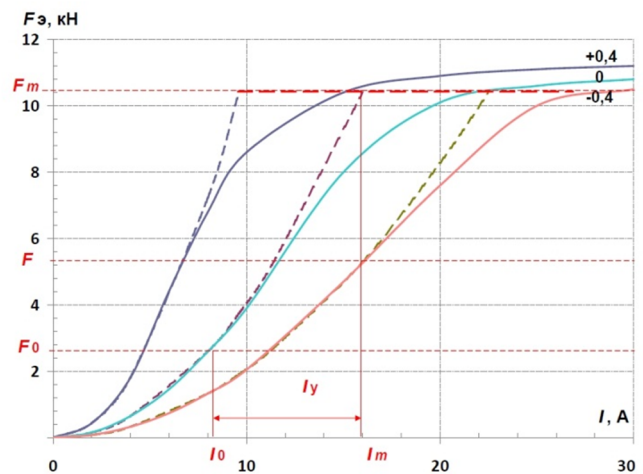


Рис. 3. Тяговые характеристики электромагнита

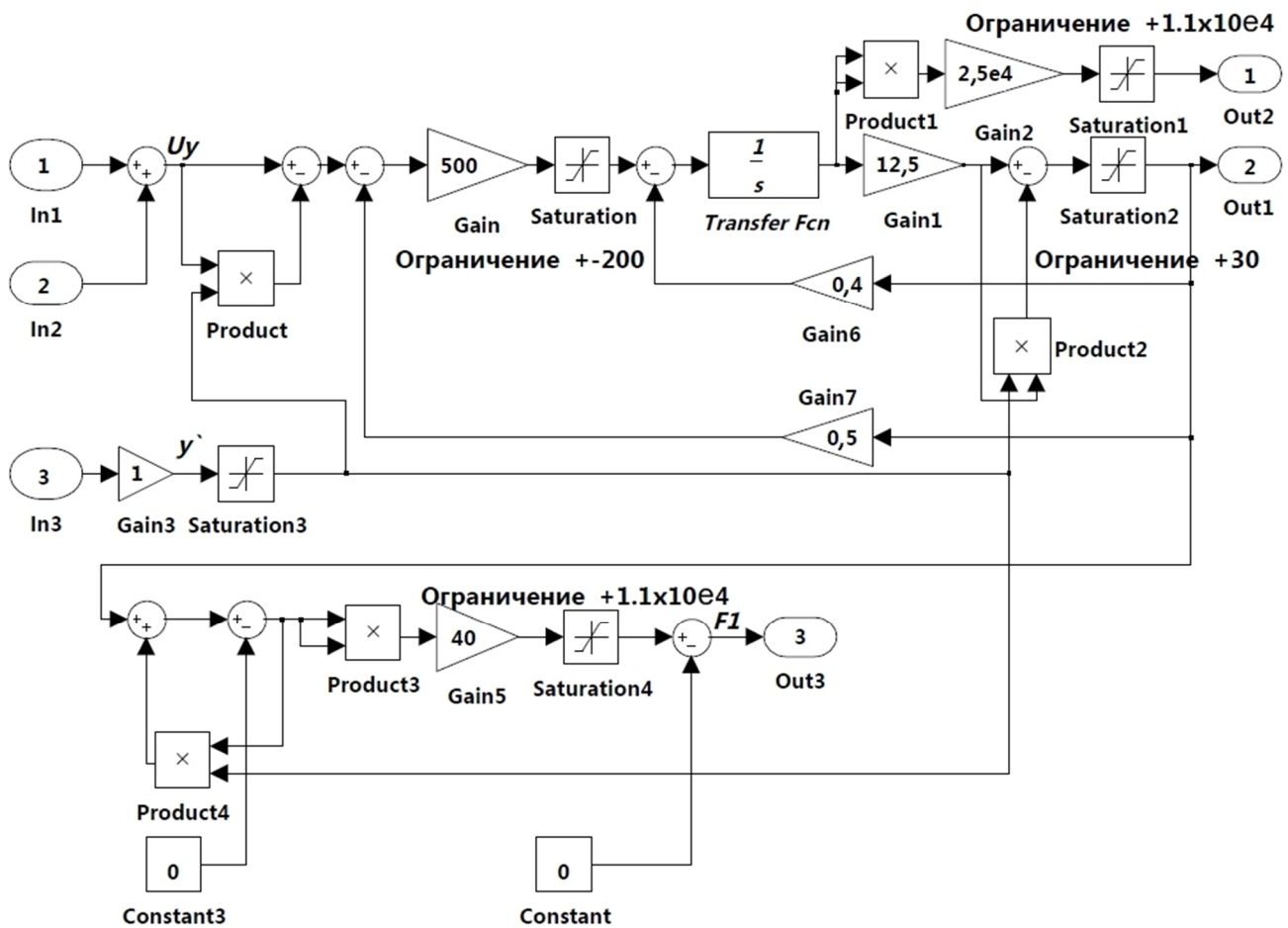


Рис. 4. Структурная схема МЭМ

Если соотношение между составляющими I_{\sim} и I_{\sim} принять равным 1, то диапазон изменения переменного выходного усилия $F_{y\sim}$ при дифференциальной схеме управления составит от 0 до F_m . Коэффициент передачи звена, преобразующего управляющий ток $I_{y\sim}$ в выходное результирующее усилие F_p , определяется соотношением следующего вида:

$$k_f = \frac{F_m}{I_0}$$

Рассмотрим виртуальный РМП, объединяющий два КУ с четырьмя одинаковыми ЭМ по взаимно перпендикулярным поперечным осям ротора.

Каждый виртуальный ЭМ характеризуется при центральном положении ротора индуктивностью, соответствующей магнитному потоку в зазоре, $L_0 = 0,08$ Гн и активным сопротивлением в цепи обмотки $R_3 = 0,4$ Ом. Тяговые характеристики такого

ЭМ при центральном положении ротора и эквивалентном зазоре между статором и ротором $a = 1$ мм соответствуют кривым, показанным на рис. 2. При моделировании процессов управления форсированным виртуальным ЭМ с обратной связью по току, в соответствии с принятой аппроксимацией и структурой, рассмотренной в [4], выбраны следующие значения параметров: коэффициенты усиления $k_y = 500$ и обратной связи $k_{oc} = 0,5$; токи смещения $I_0 = 8$ А и управления $I_y = 8$ А ($I_{y\sim} = 4$ А и $I_{y\sim} = 4$ А); соответствующие значения тяговых усилий $F_0 = 2,6$ кН, $F_{\sim} = 5,2$ кН, $F_m = 10,4$ кН; ограничения по напряжению питания $U_{\Pi} = 200$ В, току в обмотке $I_m = 0 \div 30$ А и тяговому усилию $F_m = 11$ кН.

Модель форсированного ЭМ (МЭМ) с учётом ранее разработанной модели ЭМ [5] и принципа компенсации нелинейности ЭМ, применяемого в ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ» [6], представлена на рис. 4. Анализ процессов в этой модели показывает, что создаваемое ЭМ усилие инвариантно к перемещению ротора y' . С целью подтверждения

этого факта на вход МЭМ одновременно подавались постоянный сигнал $U_0 = 4$ В и сигнал перемещений ротора y' амплитудой 0,4 и частотой $f = 10$ Гц. На рис. 5 показаны осциллограммы изменения положения y' (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 создаваемого усилия в МЭМ к перемещению ротора.

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 наложение subsystem МЭМ отдельных ЭМ. Полная схема МИО КУ для рассматриваемого виртуального РМП показана на рис. 6. Динамические свойства этой МИО, с учётом принятых компенсаций и аппроксимаций для отдельных МЭМ в пределах линейной зоны работы усилителя, для небольших переменных возмущений, соответствуют свойствам традиционных линейных систем. За пределами линейной зоны работы, например, в пе-

реходных процессах, когда действуют существующие в системе ограничения, свойства отличаются от закономерностей, характерных для линейных

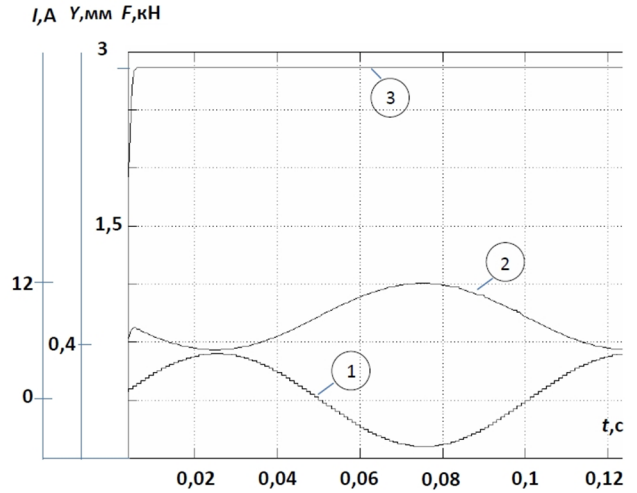


Рис. 5. Осциллограммы изменения сигналов МЭМ

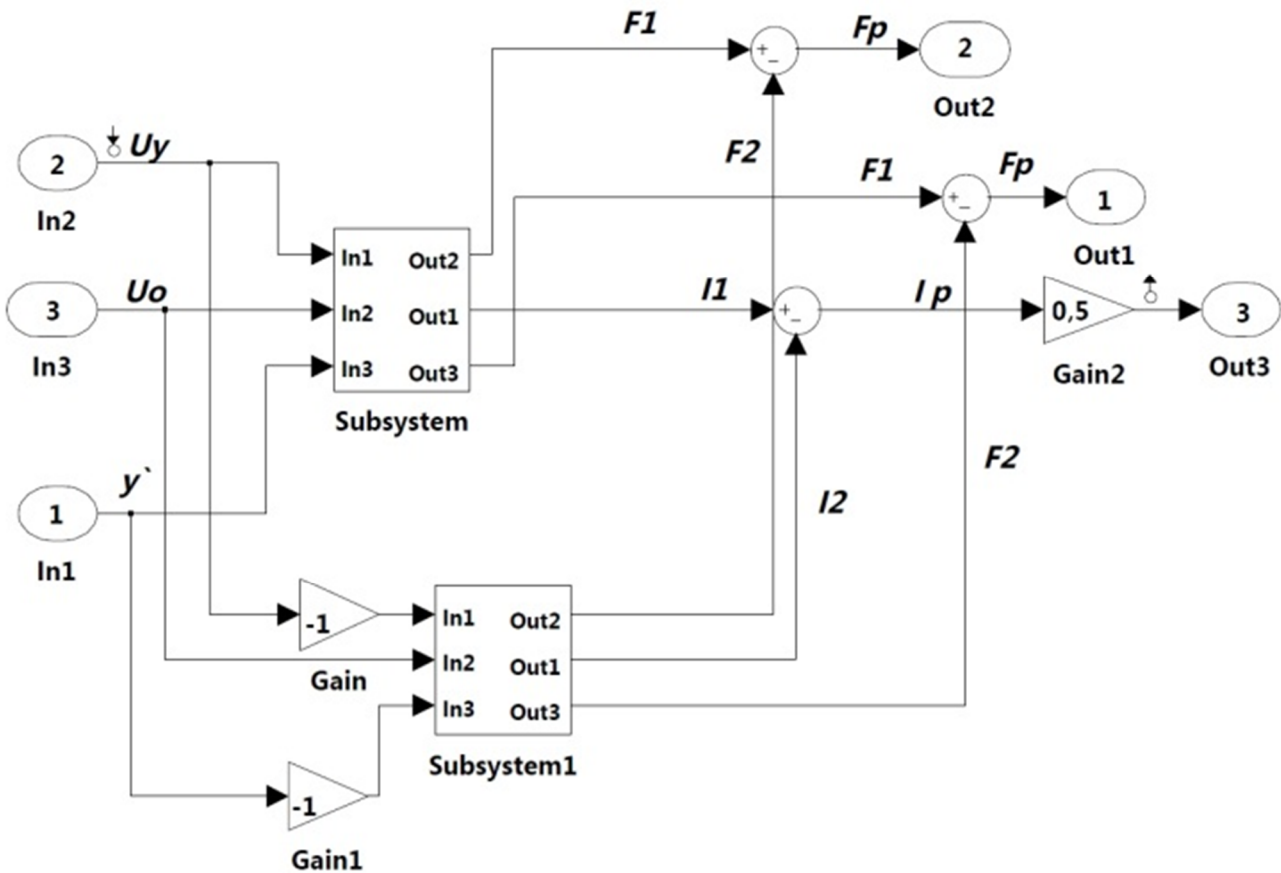


Рис. 6. Полная схема МИО

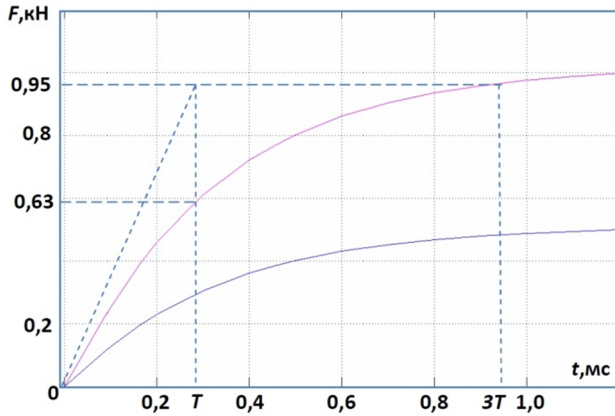


Рис. 7. ПХ усилия МИО при работе в линейной зоне

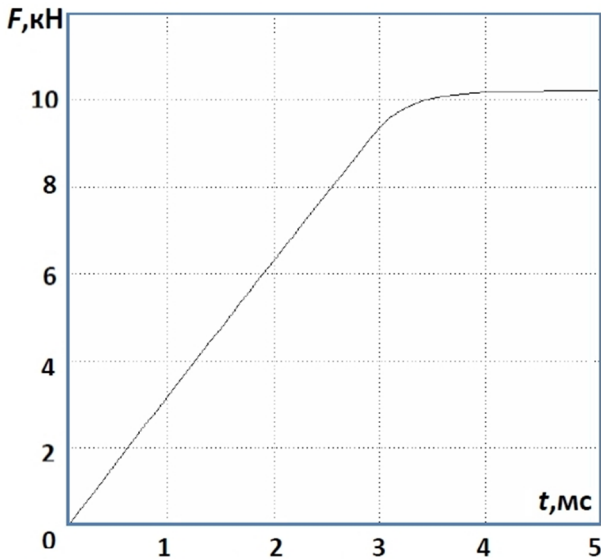


Рис. 8. ПХ усилия МИО при воздействии больших сигналов

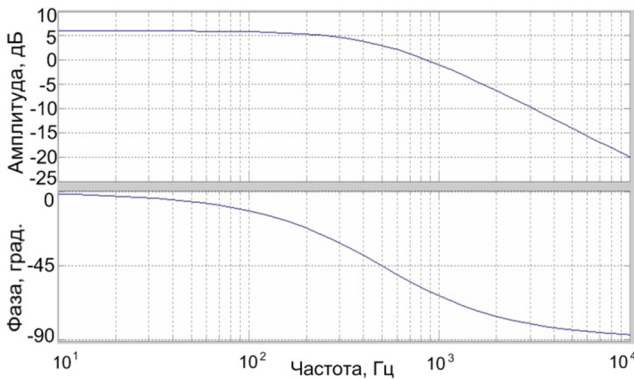


Рис. 9. ЧХ тока МИО КУ

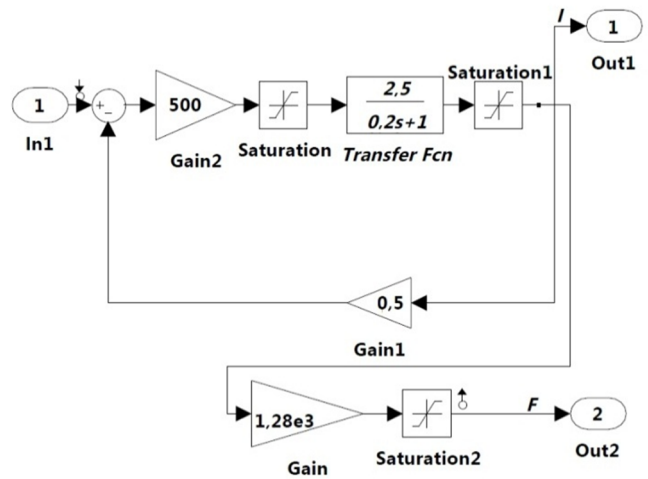


Рис. 10. Рабочая схема МИО КУ

САУ. В качестве примера на рис. 7 и рис. 8 представлены переходные характеристики (ПХ) изменения усилия F при различных уровнях управляющего сигнала U_V : во-первых, для линейной зоны работы $U_V = 0,2$ и $0,4$ В; во-вторых, для больших значений $U_V = 4$ В, соответствующих F_m .

Из анализа этих процессов следует, что в пределах линейной зоны работы усилителей характер изменения выходных величин МИО близок к экспоненциальному. Это соответствует апериодическому звену первого порядка с постоянной времени около $0,3$ мс. За пределами линейной зоны темп нарастания тока и усилия сохраняется постоянным независимо от величины установившегося значения и, следовательно, быстродействие ИО снижается с ростом уровня нагрузки. Из рис. 8 видно, что для создания усилия $10,4$ кН потребуется время около 3 мс. Это по быстродействию эквивалентно апериодическому звену с постоянной времени 1 мс, т. е. в 3 раза больше, чем при работе в линейной зоне.

На рис. 9 показаны частотные характеристики (ЧХ) изменения управляющего тока в катушках для полной схемы МИО КУ, которые соответствуют линейной зоне работы и характеризуются частотой среза 500 Гц.

Для удобства анализа динамических процессов СМП в целом полная схема МИО КУ может быть преобразована в рабочую схему МИО КУ, показанную на рис. 10. В этой схеме нет компенсирующих и нелинейных звеньев, но представлены существующие физические ограничения по напряжению, току и усилию, которые могут оказывать существенное влияние на переходные процессы в СМП. ПХ для усилия, снятые на этой МИО, соот-

ветствуют кривым, показанным на рис. 7 и 8, а ЧХ для усиления, представленные на рис. 11, по характеру адекватны ЧХ полной МИО КУ для тока, показанным на рис. 9. Однако в рабочей схеме МИО КУ по сравнению с полной схемой не учитывается влияние составляющих тока, необходимых для обеспечения линеаризации и инвариантности модели к перемещениям ротора y' , на что следует обратить внимание при анализе динамики СМП.

Таким образом, для анализа и исследования динамических процессов в СМП, связанных с определением ПХ и ЧХ на моделях, можно воспользоваться представленной на рис. 10 расчётной МИО КУ.

Динамика процессов управления в СМП в значительной мере определяется законом управления, реализуемым в относительно самостоятельном устройстве (регуляторе). В соответствии с общими подходами, изложенными в теории автоматического управления [1], 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 некоторых работах [2, 6] по обоснованию и выбору структуры ПИД-регулятора, можно передаточную функцию регулятора $W_y(s)$ записать в следующем виде:

$$W_y(s) = \frac{k_p(1+(T_0s)^{-1})(1+T_1s)(1+T_2s)}{(1+\tau_1s)(1+\tau_2s)} W_{к3}(s),$$

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; $W_{к3}(s)$ – 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 [6]. 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:

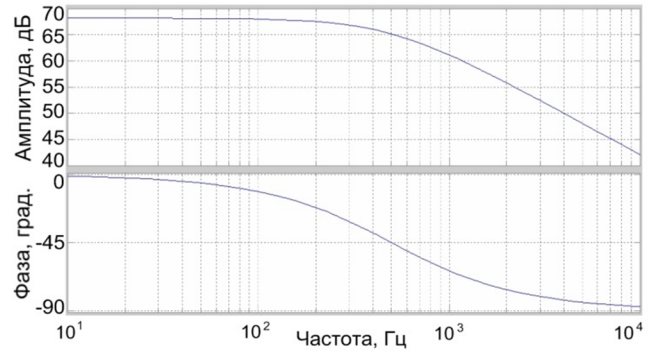


Рис. 11. ЧХ усиления для рабочей схемы МИО КУ

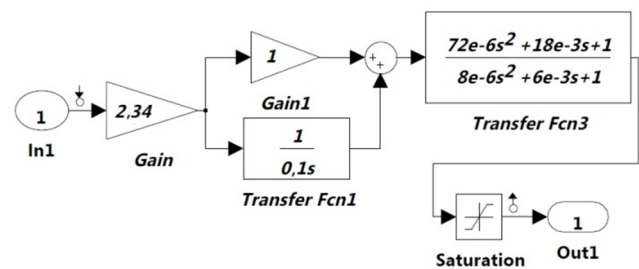


Рис. 12. Структурная схема МУ

$$T_1 \leq 1,73/\omega_1 = 12 \cdot 10^{-3} \text{ с}; \quad \tau_1 \leq 0,58/\omega_1 = 4 \cdot 10^{-3} \text{ с};$$

$$T_2 \leq 1,73/\omega_2 = 6 \cdot 10^{-3} \text{ с}; \quad \tau_2 \leq 0,58/\omega_2 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ с};$$

$$T_0 \geq 8 \cdot T_1 = 0,1 \text{ с}.$$

Переходя к форме записи передаточной функции ПД звена в виде полиномов и принимая предварительно $W_{к3}(s) = 1$, получим выражение для $W_y(s)$ в следующем виде:

$$W_y(s) = k_p(1+1/T_0s) \frac{T_{11}s^2 + T_{21}s + 1}{\tau_{11}s^2 + \tau_{21}s + 1},$$

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.

№ формы	ω_i , 1/с	$2\xi \omega_i$, 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	0,0402
3	765	15,3	-0,0335	-0,0408	-0,0426	-0,0283
4	1771	35,4	-0,0094	0,0115	-0,0285	-0,0067

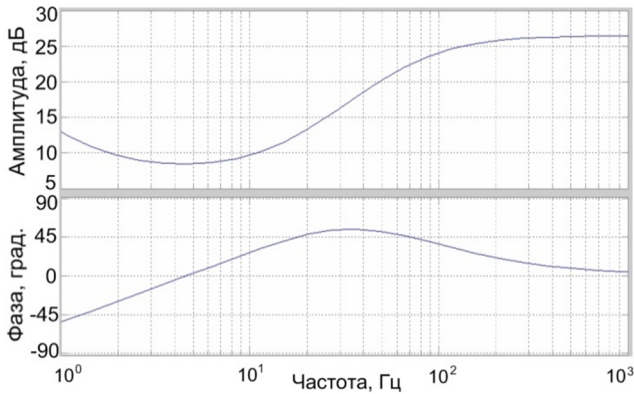


Рис. 13. Общий вид ЧХ МУ

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.

Расчёту динамических свойств сложных роторных систем применительно к устройствам с СМП посвящены специальные работы отечественных и зарубежных авторов, в том числе одна из публикаций [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 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

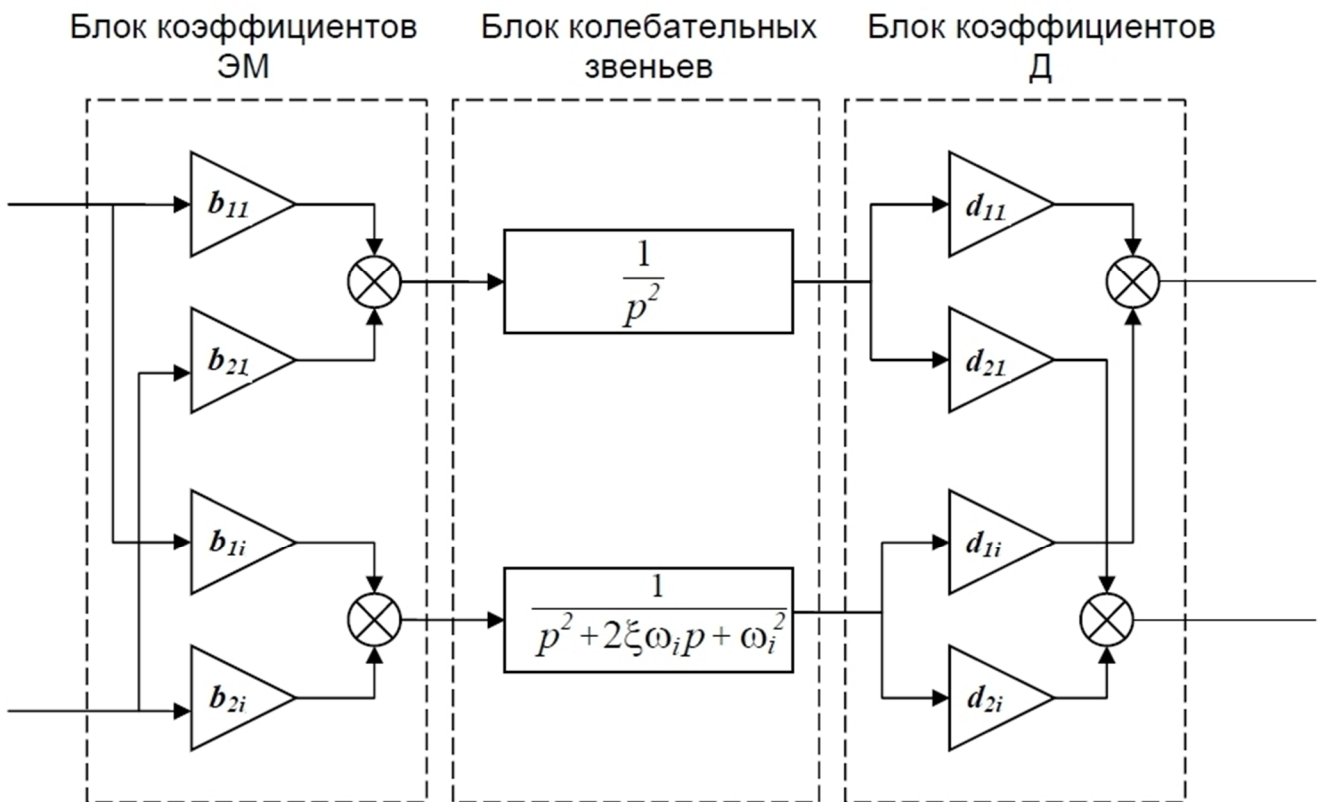


Рис. 14. Общая схема МР

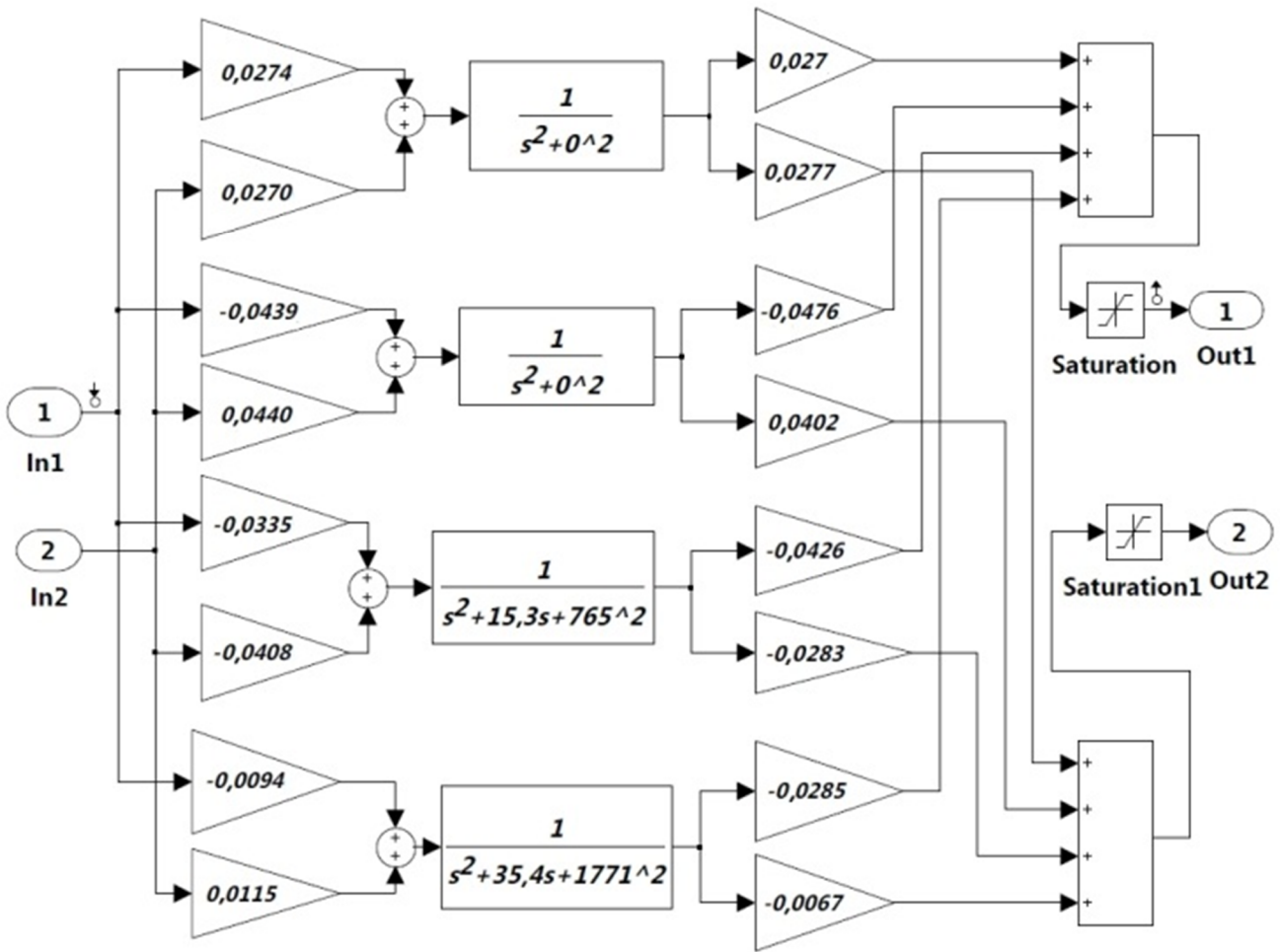


Рис. 15. Расчётная схема МР

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 таблице. 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. Расчётная схема МР, соответствующая данным таблицы, 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.

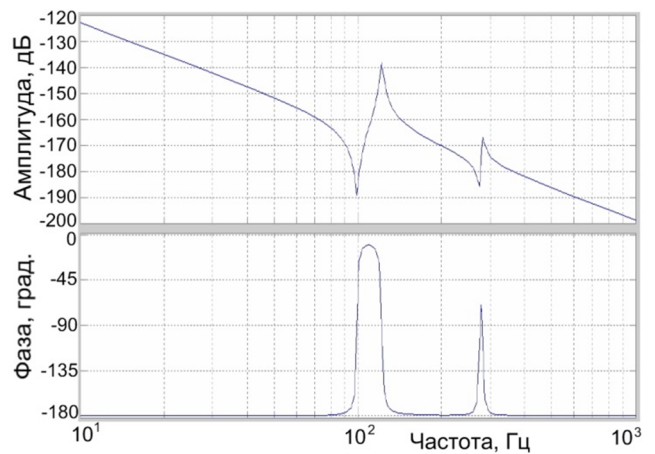


Рис. 16. Общий вид ЧХ МР

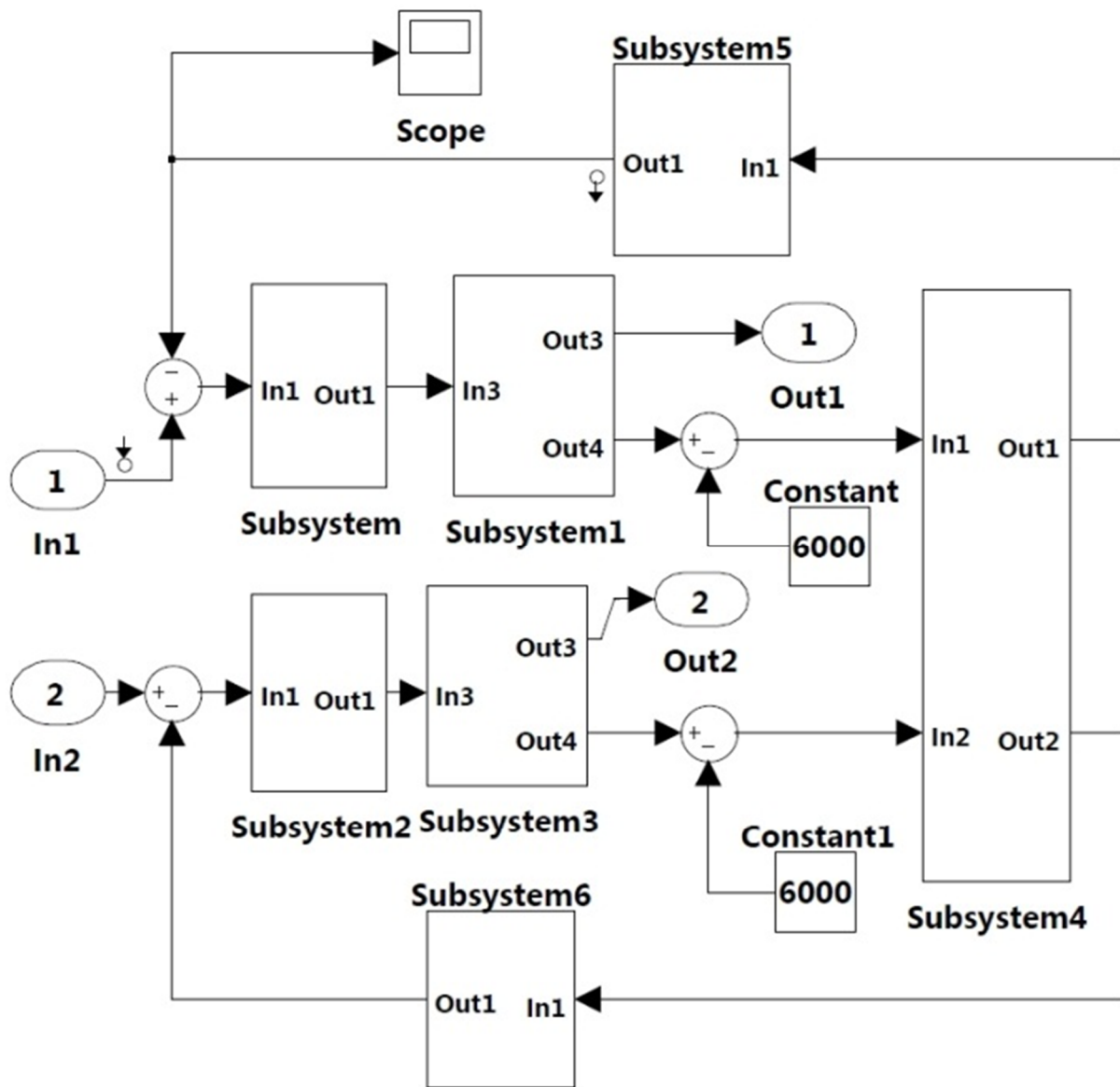


Рис. 17. Расчётная схема МС

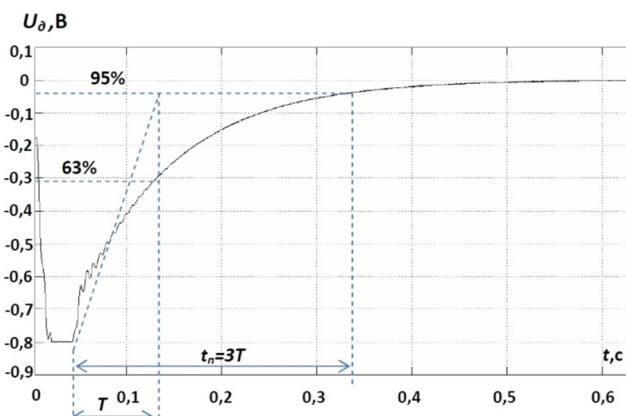


Рис. 18. ПХ изменения положения ротора при включении СМП

Возвращаясь к общей структурной схеме МС, показанной на рис. 1, и раскрывая представленные выше схемы М отдельных устройств, получаем расчётную схему МС, которая может быть использована для определения ПХ и ЧХ на этапах проектирования и экспериментальных исследований СМП. В этой схеме МС, показанной на рис. 17, схемы М отдельных устройств, которые были подробно рассмотрены в данной статье ранее, представлены в виде отдельных блоков Sub. 0÷6 для двух КУ соответствующих РМП ротора. Кроме того, для имитации веса ротора (у машин с горизонтальным расположением ротора) предусмотрены точки, которые могут быть использованы также для приложения возмущающих воздействий. Эти

точки и соответствующие входы 1 и 2 предназначены для приложения имитационных сигналов и снятия выходных сигналов при определении ЧХ, как отмечено на рис. 17 соответствующими маркерами. Рассмотренные способы приложения имитационных воздействий аналогичны приёмам, используемым на практике при экспериментальных исследованиях машин с СМП в ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ». При таком подходе обеспечивается адекватность условий определения расчётных и экспериментальных характеристик. В результате упрощается анализ полученных данных.

В качестве примера рассмотрим ПХ и ЧХ, полученные на данной МС для СМП виртуального ротора с параметрами, приведёнными выше.

ПХ изменения положения ротора при включении СМП, когда ротор из горизонтального нижнего положения ($y = -0,4$ мм) под воздействием двух РМП переходит в центральное положение ($y = 0$) показана на рис. 18. По характеру изменения положения ротора процесс перемещения, начиная с момента отрыва от упора ($t \cong 0,04$ с), соответствует примерно экспоненциальному закону. Длительность переходного процесса, когда выходная величина изменилась на 95%, составляет $t_{п} = 0,3$ с, что эквивалентно постоянной времени $T \cong 0,1$ с. Такой характер изменения положения ротора свидетельствует о хороших демпфирующих свойствах СМП в рабочем диапазоне скоростей вращения (до 100 Гц). Однако в начале движения ротора заметны колебания ротора с частотой около 130 Гц, которые характерны для первой упругой формы колебаний ротора.

Для оценки динамических свойств СМП в широком диапазоне частот, в т. ч. за пределами рабочих скоростей вращения можно воспользоваться ЧХ поперечных колебаний ротора в СМП, показанными на рис. 19. Из этих характеристик видно, что в рабочем диапазоне скоростей до частоты 100 Гц наблюдаются подъёмы АЧХ на критических частотах около 25 и 80 Гц, соответствующих симметричным и косым формам колебаний ротора. Причём, подъёмы АЧХ на первой частоте 25 Гц не превышает 2 дБ, что свидетельствует о приемлемом качестве управления рассматриваемой СМП. Значительный подъём АЧХ до 9 дБ отмечается на критической частоте 130 Гц, соответствующей первой изгибной форме колебаний ротора. Кроме того, следует обратить внимание на резонансные колебания на частоте около 290 Гц, которые соответствуют второй изгибной форме колебаний ро-

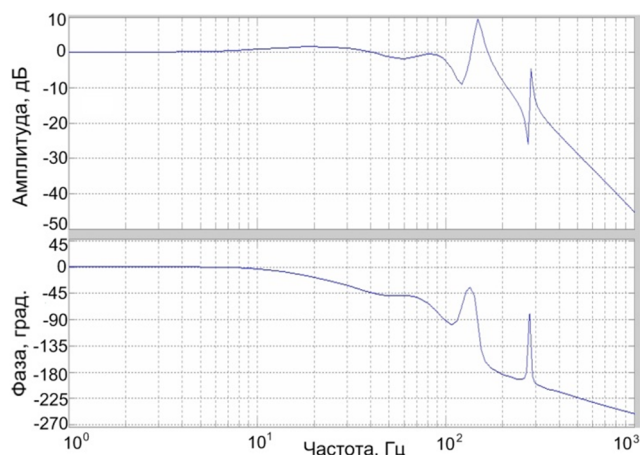


Рис. 19. ЧХ поперечных колебаний ротора в СМП

тора. Способы снижения уровня колебаний на этих резонансных частотах, несомненно, заслуживают внимания, и их предполагается рассмотреть в последующих публикациях по вопросам выбора типа корректирующих звеньев и заградительных фильтров.

Выводы

1. Анализ динамических процессов и свойств СМП, проводимый в ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ», базируется на разработанных специальных М для отдельных устройств и системы в целом с использованием стандартной компьютерной программы Matlab Simulink.
2. Рассмотренные М позволяют получить ПХ и ЧХ, которые характеризуют основные динамические свойства СМП и могут быть использованы как при проектировании, так и при экспериментальных исследованиях СМП.
3. Показана возможность представления МИО КУ в виде комбинации, пригодной для снятия ПХ и ЧХ, состоящей из простого апериодического звена с учётом звеньев ограничений по напряжению питания и тяговому усилию.
4. Проведена верификация разработанных М на основе адекватности полученных результатов и аналитических расчётов для виртуальной СМП.

Литература

1. Ерофеев А. А. Теория автоматического управления / А. А. Ерофеев. – СПб.: Политехника, 2005. – 301 с.
2. Журавлёв Ю. Н. Активные магнитные подшипники: теория, расчёт, применение / Ю. Н. Журавлёв. – СПб.: Политехника, 2003. – 206 с.
3. Магнитный подвес роторов электрических машин и механизмов. Труды НПП ВНИИЭМ. – М.: НПП ВНИИЭМ, 1989. – Т. 89. – 135 с.

4. Моделирование процессов управления электромагнитными в системах магнитного подвеса / В. П. Верещагин, А. В. Рогоза // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – М.: ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2013. – Т. 136. – С. 3–8.
5. 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.
6. Структура системы управления электромагнитными подшипниками / Д. Н. Богданов, В. П. Верещагин // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2010. – Т. 114. – № 1. – С. 9–14.
7. 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.

Поступила в редакцию 23.12.2014

*Владимир Петрович Верещагин, 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.

Татьяна Николаевна Савинова, мл. научн. сотрудник, т. (495) 366-26-10.

*Александр Васильевич Спирин, канд. техн. наук, ведущий специалист, т. (495) 366-26-10.
E-mail: vniien@vniiem.ru.*