

УДК 621.313

## ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ПОДШИПНИКАМИ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ПО МАГНИТНОМУ ПОТОКУ

В. П. Верещагин, И. В. Гурова, А. В. Рогоза

*Рассмотрена система управления радиальным электромагнитным подшипником, в которой при управлении электромагнитом в качестве обратной связи используется специальный вычислитель сигнала магнитного потока (ВМП) электромагнита. На основе анализа передаточных функций системы с обратной связью по магнитному потоку получены ключевые положения для характеристики протекающих динамических процессов. Проведено математическое моделирование процессов управления электромагнитом с применением ВМП. Сравнение переходных и частотных характеристик этой системы показывает, что погрешности, возникающие из-за возможного расхождения в параметрах ВМП и электромагнита, могут быть уменьшены путём корректировки соответствующих коэффициентов передачи в системе. Кроме того, полученные результаты исследований свидетельствуют о возможности применения разработанных методов моделирования для решения вопросов управления более сложных систем осевых электромагнитных подшипников с использованием ВМП и с учётом потоков рассеяния и вихревых токов в магнитопроводе.*

**Ключевые слова:** электромагнитные подшипники, система управления электромагнитами, вычислитель магнитного потока, моделирование процессов управления, частотные характеристики, переходные функции.

Анализ существующих разработок систем магнитного подвеса (СМП) для различных электромеханических устройств показывает, что для управления электромагнитами применяются в основном два разных способа, отличающиеся типом сигнала отрицательной обратной связи, используемым для управления электромагнитами.

Во-первых, наиболее распространённым в разработках АО «Корпорация «ВНИИЭМ» является применение обратной связи по току в обмотке электромагнита. Такой тип управления относительно прост в аппаратной реализации и подробно рассматривается в ряде публикаций отечественных [1] и зарубежных [2] исследователей. Вместе с тем следует отметить основной недостаток этого типа управления, обусловленный возникновением в электромагните, кроме центрирующего тягового усилия, децентрирующей «отрицательной позиционной» силы. Это требует применения дополнительных мер по снижению этого негативного влияния, связанных с усложнением алгоритма управления системой в целом. Часто применяются специальные компенсирующие звенья, которые корректируют ток в обмотке электромагнита в зависимости от перемещений ротора.

Кроме того, при управлении по току в обмотке электромагнита в создаваемом тяговом усилии может возникать запаздывание из-за вихревых токов в магнитопроводе. В осевых электромагнитных подшипниках (ОМП) это проявляется особенно заметно, так как магнитопровод является массивным. В предшествующих публикациях на эту тему [3] отмечалось, что при изменении напряжения пи-

тания на частотах свыше 5 Гц следует учитывать в управлении влияние этих факторов.

Возникает необходимость в применении второго способа управления электромагнитами с использованием отрицательной обратной связи по магнитному потоку в зазоре между статором и ротором. Однако существуют технические сложности с получением сигнала магнитного потока. В последние годы рассматривается возможность применения для этой цели специального вычислителя сигнала магнитного потока (ВМП) [4]. Эту комплексную задачу целесообразно рассмотреть в два этапа. Во-первых, следует рассмотреть особенности управления по магнитному потоку в сравнении с традиционным способом, использующим обратную связь по току. Для этой цели ограничимся моделированием радиального электромагнитного подшипника (РМП), в котором не учитываются вихревые токи в магнитопроводе и потоки рассеяния.

Во-вторых, проверенные ключевые положения на первом этапе используются для моделирования и анализа результатов с учётом вихревых токов в ОМП.

Целью данной статьи является анализ основных особенностей управления РМП с обратной связью по магнитному потоку и применение полученных результатов при моделировании процессов управления с использованием сигнала полученного в ВМП.

В соответствии с принятыми в АО «Корпорация «ВНИИЭМ» подходами, изложенными в предыдущей публикации [4], исходные уравнения для цепи обмотки РМП в сочетании с упро-

щёнными выражениями для тягового усилия могут быть представлены в следующем виде:

$$\begin{aligned} U &= \frac{d\Psi}{dt} + IR; \\ \Psi &= L_0 I / (1 - X'); \\ F_{\text{Э}} &= K_f \Psi^2, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $U$  – напряжение, приложенное к обмотке;  $\Psi$  – потокосцепление, соответствующее потоку между статором и ротором;  $I$  – ток в обмотке;  $L_0$  – индуктивность, соответствующая магнитному потоку при центральном положении ротора;  $R$  – активное сопротивление обмотки;  $X'$  – относительное отклонение ротора от центрального положения;  $X' = X_p/a$ , где  $X_p$  – отклонение ротора,  $a$  – зазор между статором и ротором при центральном положении;  $F_{\text{Э}}$  – тяговое усилие, действующее на ротор.

На основании этих исходных уравнений (1) можно составить структурную схему модели управления РМП с отрицательной обратной связью по магнитному потоку, показанную на рис. 1, где модель РМП выделена красным прямоугольником.

Управление электромагнитом осуществляется по входному сигналу  $U_{\text{ВХ}}$ , который сравнивается с сигналом обратной связи по магнитному потоку  $U_{\text{ОП}}$ . Сигнал рассогласования усиливается с коэффициентом  $K_y$  и подаётся на обмотку электромагнита в виде напряжения питания  $U$ . Далее вычисляется сигнал потокосцепления  $U_{\text{МП}}$ , который получается в результате интегрирования в звене  $1/s$  разницы между напряжением  $U$  и падением напряжения на активном сопротивлении обмотки электромагнита. Причём ток  $I$ , в соответствии с исходными уравнениями (1), определяется из вто-

рого соотношения. Третье соотношение уравнений позволяет вычислить тяговое усилие электромагнита, принимая значение постоянного коэффициента  $K_f = 1/2aL_0$ .

Рассматривая отдельные участки данной структурной схемы, получим расчётные уравнения для вывода выражений передаточных функций, перечисленных выше выходных сигналов. По виду этих передаточных функций можно судить о статических и динамических свойствах данного типа управления.

Уравнение для входных цепей схемы, связывающее  $U_{\text{ВХ}}$  с  $U_{\text{МП}}$ , для центрального положения ротора ( $X_p = 0$ ) может быть представлено в следующем виде:

$$(U_{\text{ВХ}} - K_{\text{ОС}}U_{\text{МП}}) K_y - U_{\text{МП}}/T_{\text{Э}} = U_{\text{МП}} \cdot s, \quad (2)$$

где  $T_{\text{Э}} = L_0/R$  – постоянная времени электромагнита при центральном положении ротора.

Приведём уравнение (2) к стандартному виду:

$$U_{\text{МП}} = \frac{1}{s / K_y + K_{\text{ОС}} + 1/T_{\text{Э}}K_y} U_{\text{ВХ}}. \quad (3)$$

Из выражения (3), при условии  $T_{\text{Э}}K_yK_{\text{ОС}} \gg 1$ , получаем передаточную функцию  $W_{\text{МП}}$  в приближённом и удобном для анализа виде:

$$W_{\text{МП}} = \frac{1 / K_{\text{ОС}}}{s / K_y K_{\text{ОС}} + 1}. \quad (4)$$

Передаточная функция (4) соответствует апериодическому звену первого порядка, у которого коэффициент передачи и постоянная времени не зависят от параметров электромагнита  $L_0$  и  $R$ .

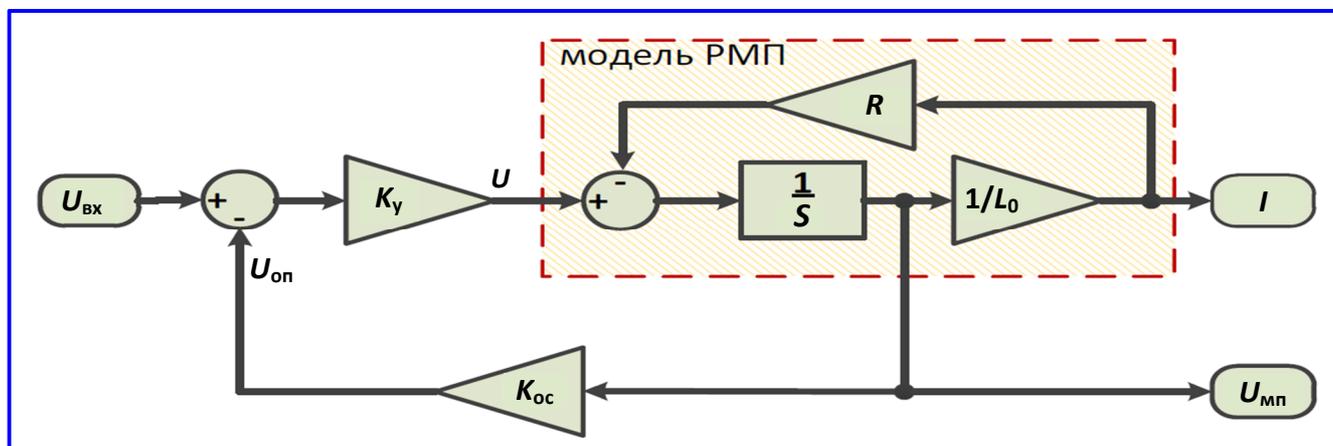


Рис. 1. Структурная схема управления с обратной связью по магнитному потоку

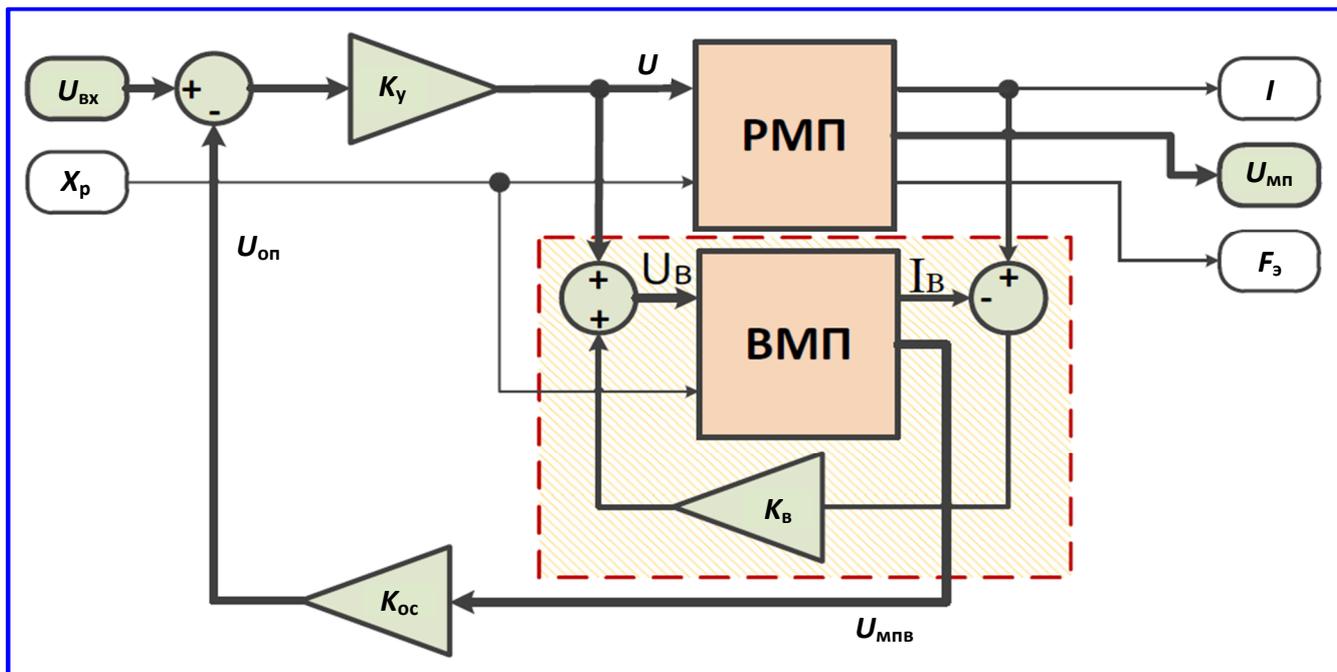


Рис. 2. Структурная схема управления РМП с использованием ВМП

Аналогично можно получить передаточную функцию  $W_T$  для сигнала выходного тока в виде:

$$W_T = \frac{1 / K_{oc} I_0}{s / K_y K_{oc} + 1}. \quad (5)$$

Следует отметить, что коэффициент передачи звена, соответствующего функции (5), обратно пропорционален значению индуктивности  $L_0$ .

Уравнение для напряжения питания электромагнита  $U$  можно представить в виде разности двух составляющих следующим образом:

$$U = (U_{BX} - U_{МП} K_{OC}) K_y. \quad (6)$$

Первая составляющая  $U_{BX}$  является постоянной во времени, а вторая изменяется по экспоненциальному закону с постоянной времени, соответствующей выражению (4). Установившееся значение этого напряжения  $U_{уст}$  после преобразования уравнения (6) можно представить в следующем виде:

$$U_{уст} = (1 / T_Э K_{OC}) U_{BX}. \quad (7)$$

Анализ соотношений между параметрами схемы рис. 1 и сигналами, соответствующими уравнениям (2) – (7), позволяет отметить некоторые ключевые положения, которые могут представлять интерес при моделировании процессов управления электромагнитами с использованием обратной связи по магнитному потоку. В частности, следует обратить внимание

на некоторые особенности, проявляющиеся в переходных характеристиках соответствующих сигналов:

1. Сигнал обратной связи по магнитному потоку  $U_{МП}$  изменяется во времени по экспоненциальному закону с коэффициентом пропорциональности  $1 / K_{OC}$  и постоянной времени  $1 / K_y K_{OC}$ , т. е. изменения параметров электромагнита практически не влияют на характер переходного процесса.

2. В сигнале выходного тока  $I$  установившееся значение обратно пропорционально индуктивности электромагнита  $L_0$  и  $K_{OC}$  в отличие от  $U_{МП}$ , где оно обратно пропорционально только  $K_{OC}$ .

3. Установившееся значение напряжения питания электромагнита  $U_{уст}$  обратно пропорционально постоянной времени электромагнита  $T_Э$  и  $K_{OC}$ .

Используя эти ключевые положения, рассмотрим процессы управления РМП с обратной связью по магнитному потоку. Сигнал обратной связи поступает от ВМП электромагнита. В качестве объекта управления принят виртуальный электромагнит с параметрами:  $L_0 = 0,08$  Гн;  $R = 0,4$  Ом;  $a = 10^{-3}$  м. Соответствующая структурная схема показана на рис. 2. В этой схеме исследуемый виртуальный электромагнит и ВМП показаны в виде отдельных subsystem РМП и ВМП. Структурная схема каждой из этих subsystem соответствует схеме, показанной на рис. 3. Значения параметров, указанные в данной схеме, соответствуют исходному состоянию. В общем случае воздействующее входное напряжение  $U_{BX}$  может быть представлено в виде суммы посто-

янной  $U_0$  и переменной  $U_{\sim}$  составляющих. Соответственно сигнал магнитного потока  $U_{мп}$  содержит две составляющих:  $U_{M0}$  и  $U_{M\sim}$ . В нижней части схемы, показанной на рис. 3, тонкими линиями отражены цепи преобразования сигналов для определения общего тягового усилия электромагнита  $F_{\Sigma}$  и переменной составляющей  $F_{\sim}$ , которая используется при снятии частотных характеристик (ЧХ). Причём эта часть подсистемы относится только к РМП.

Исследования динамических свойств системы при управлении с использованием ВМП проводятся путём моделирования в стандартной компьютерной программе Matlab Simulink. Сравниваются переходные функции (ПФ) и ЧХ для различных вариантов сочетаний параметров РМП и ВМП и изменения значений коэффициента коррекции вычислителя  $K_B$ . При моделировании рассматриваемых вариантов приняты значения коэффициентов усиления  $K_y = 1000$  и обратной связи  $K_{oc} = 1$ . Сопоставление проводится для следующих вариантов:

1. В исходном варианте (В1) принимается, что параметры управляемого электромагнита (РМП) и вычислителя (ВМП) совпадают. В этом случае разницы между токами электромагнита  $I$  и вычислителя  $I_B$  нет, следовательно  $K_B$  может быть любым, он не повлияет на характеристики системы.

2. Во втором варианте (В2) оценивается влияние разброса параметров между РМП и ВМП на примере сравнения ПФ и ЧХ при значениях  $1/L_{0B}$ , равных 10 и 15, т. е. при отклонениях от исходного состояния на 25%. В этом варианте влияние корректирующей цепи не учитывается, т. е.  $K_B = 0$ .

3. В третьем варианте (В3) оценивается влияние корректирующей цепи. По сравнению с В2 подключается корректирующая цепь и увеличивается значение коэффициента  $K_B$  до получения монотонного характера изменения магнитного потока.

На основании полученных результатов сравнения ПФ и ЧХ можно оценить в первом приближении степень влияния разброса параметров между электромагнитом и наблюдателем и рассмотреть возможные способы приближения динамических свойств к исходным.

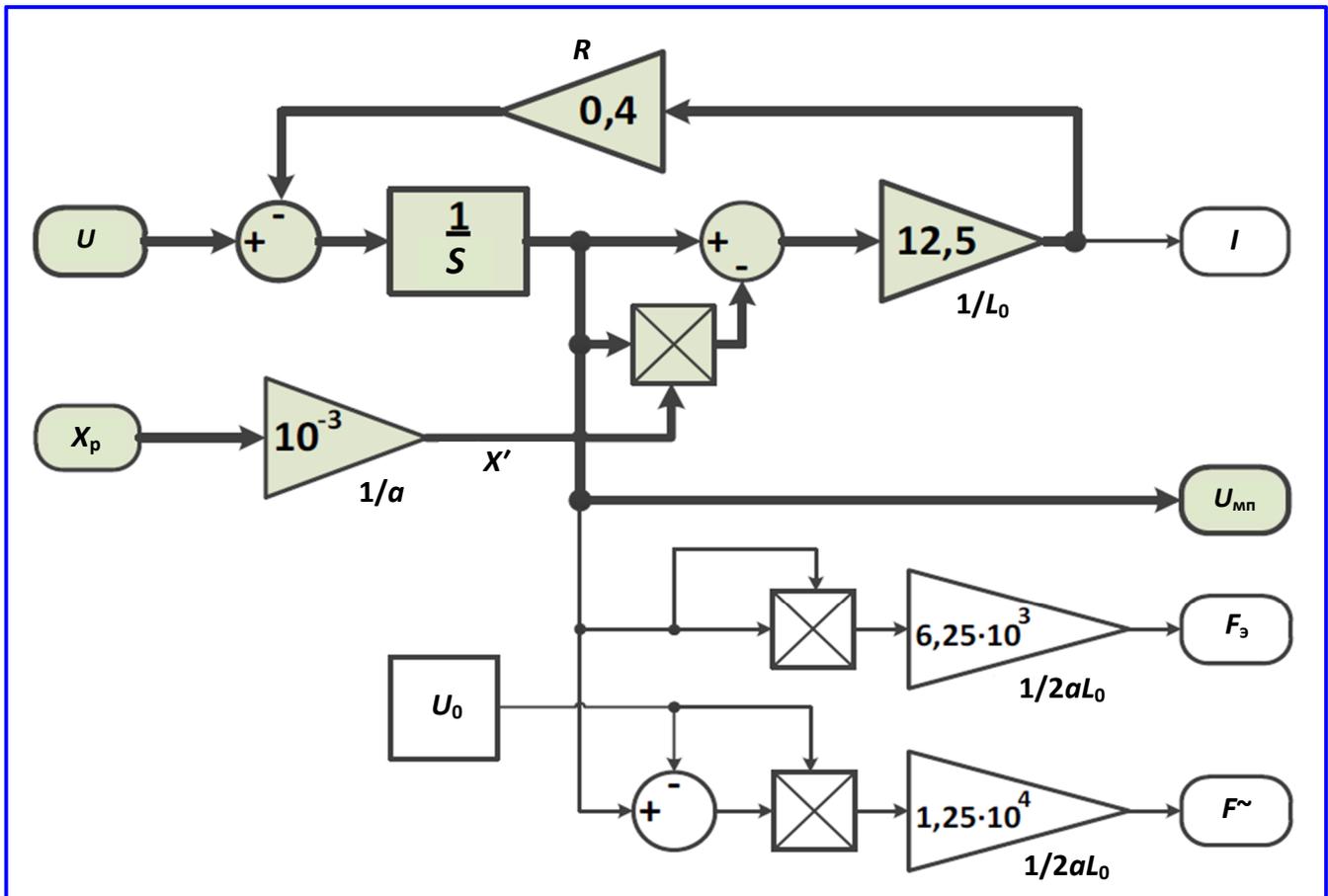


Рис. 3. Схема подсистемы виртуального электромагнита

Рассмотрим подробнее перечисленные выше варианты.

В исходном В1 снятая ПФ изменения сигнала магнитного потока, показанная на рис. 4, близка к экспоненциальному закону. Постоянная времени составляет  $10^{-3}$  с, что согласуется с ранее отмечаемыми ключевыми положениями, изложенными выше.

Общий вид ЧХ для исходного В1, показанный на рис. 5, характеризует изменение  $F_{\omega}$  в функции  $U_{\omega}$  при одновременном воздействии постоянного входного сигнала  $U_0 = 1$ . Представленная амплитудная (АЧХ) и фазовая (ФЧХ) частотные характеристики имеют стандартную форму, соответствующую апериодическому звену первого порядка. Частота среза составляет около 160 Гц, что соответствует постоянной времени, полученной из представленных выше ПФ. Следует обратить внимание, что ПФ и ЧХ снимаются при центральном положении, т. е. при неподвижном роторе ( $X_p = 0$ ). Инвариантность рассматриваемой системы к перемещениям ротора при использовании в ВМП цепи с  $X_p$  была доказана в предшествующих работах [3, 4].

Таким образом, полученные результаты в В1 свидетельствуют о возможности использования ВМП электромагнита для управления с отрицательной обратной связью по магнитному потоку в широком частотном диапазоне и перемещении ротора в пределах зазора в страховочных подшипниках.

Рассмотрим влияние на динамические свойства системы управления электромагнитом разбросов, которые могут возникать из-за отличия параметров ВМП от реальных значений или данных РМП.

В варианте В2 по снятым для магнитного потока ПФ, показанным на рис. 6, оценивается величина разницы, которая возникает при изменении значений индуктивности  $L_{0В}$  в ВМП примерно на 25% по сравнению с РМП. Основное отличие между рассматриваемыми ПФ наблюдается в установившихся значениях магнитного потока. В начальной части кривых рис. 6 процесс нарастания магнитного потока практически соответствует исходному состоянию В1, а затем медленно (с постоянной времени – примерно 0,2 с) стремится к своим установившимся значениям, которые на графиках отмечены пунктирными линиями. Кривая 1, соответствующая исходному В1, показана на графиках синим цветом, кривая 2, снятая для значений  $1/L_{0В} = 15$ , нарисована красным цветом, а для значений  $1/L_{0В} = 10$  нанесена зелёным цветом.

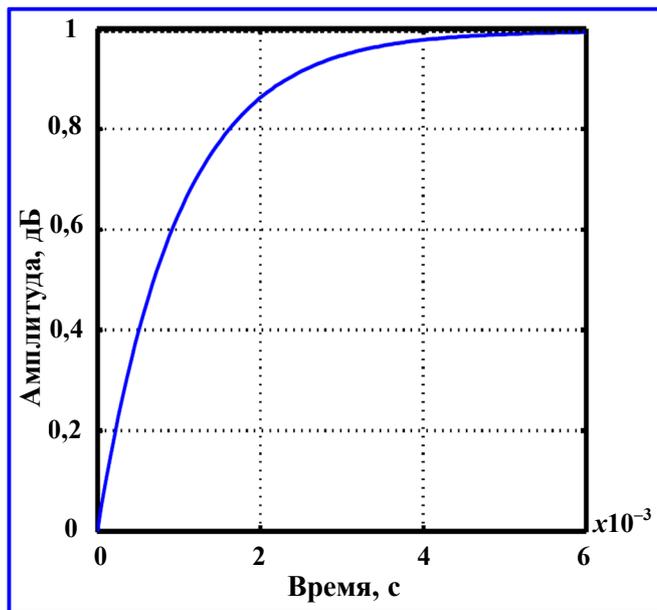


Рис. 4. Кривая изменения магнитного потока РМП для В1

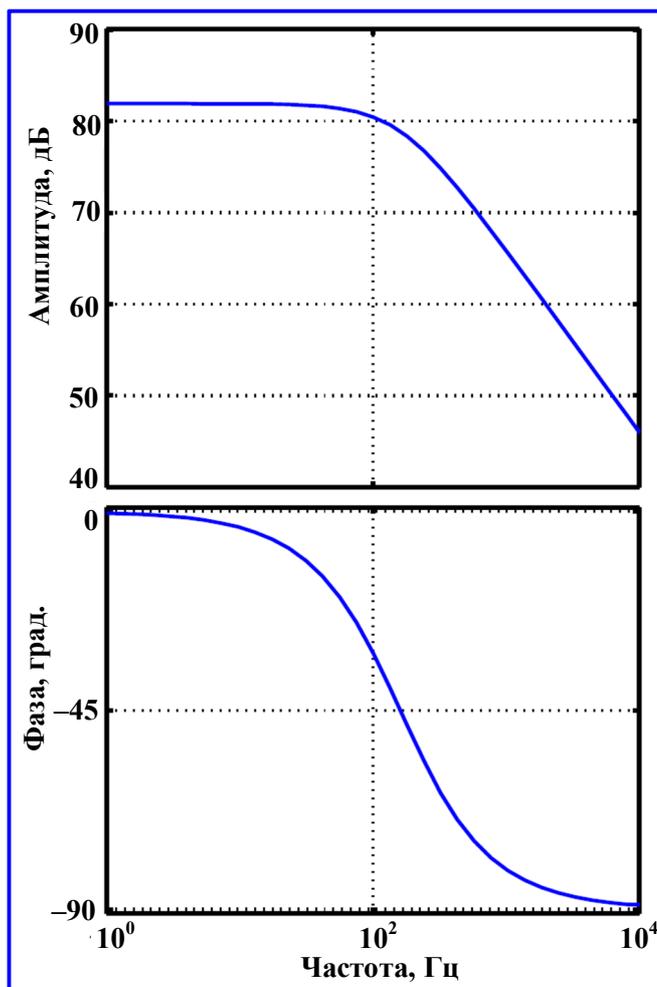


Рис. 5. Общий вид ЧХ для В1

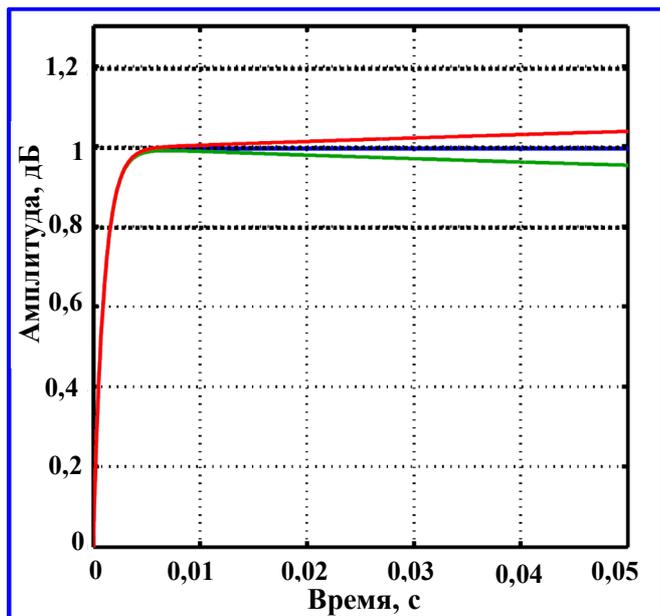


Рис. 6. ПФ магнитного потока РМП для В2

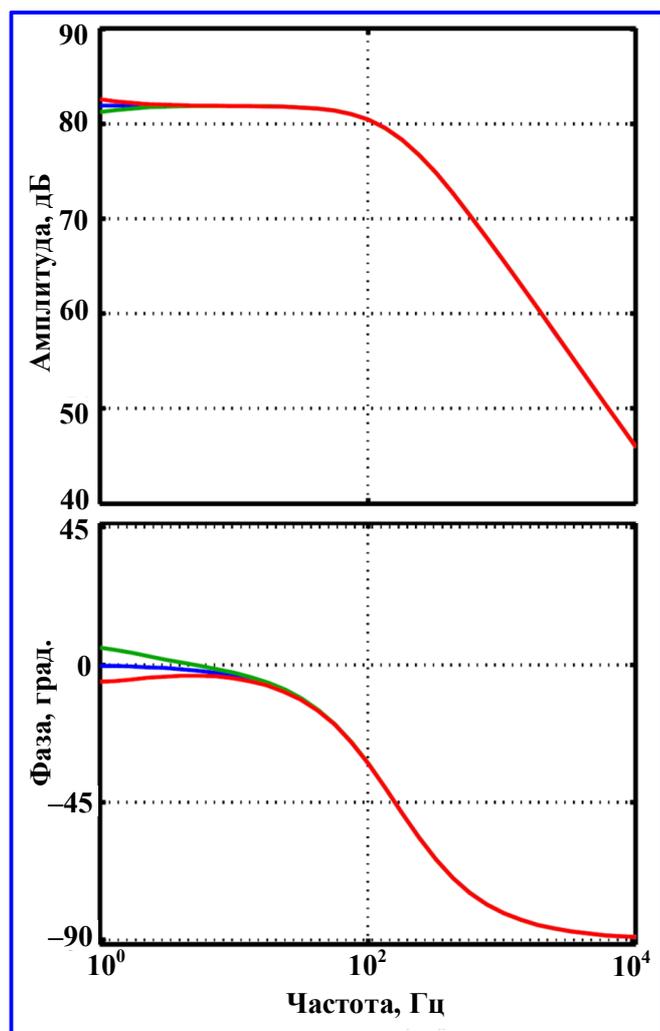


Рис. 7. ЧХ усиления РМП для В2

Следует обратить внимание, что после начального участка на кривых 2 и 3 заметно выражен перелом. Характер изменения магнитного потока в начальной части кривых ПФ до перелома определяется в основном системой управления с ВМП. Дальнейшее расхождение кривых к своим установившимся значениям обусловлено разницей на данный момент в установившихся значениях напряжения на электромагните. Это отмечено в ключевом положении 3 по поводу зависимости данного напряжения от параметров ВМП. Характер изменения магнитного потока РМП за переломом ПФ в пределах существующего расхождения, обусловленного изменением  $L_{0B}$ , протекает естественным путём, без учёта  $K_{y3}$ , с постоянной времени РМП.

Соответствующие ЧХ для В2, показанные на рис. 7, имеют отличия от исходных только в низкочастотной области до 10 Гц. Разница в коэффициенте передачи по АЧХ на частоте 1 Гц не превышает 10%, а в фазе по ФЧХ –  $\pm 3$  град. Частота среза практически не меняется и составляет около 160 Гц.

Следует отметить, что указанные различия ПФ и ЧХ, появляющиеся при изменении значений  $L_0$ , соответствуют системе управления без учёта корректирующей цепи, т. е. при  $K_B = 0$ . Постепенное подключение этой цепи путём увеличения  $K_B$  может приводить к снижению влияния разброса параметров между ВМП и РМП, рассмотренных выше.

В варианте В3, для которого ПФ показаны на рис. 8, при увеличении корректирующего коэффициента до  $K_B = 50$  характер изменения магнитного потока становится практически монотонным. Разница в установившихся значениях магнитного потока при соответствующих изменениях  $L_{0B}$  сохраняется. Выбросы в области перелома ПФ сокращаются до 5% от установившегося значения, что характеризует приближение процессов к экспоненциальному закону.

Судя по ЧХ для В3, показанным на рис. 9, разница в амплитудных значениях создаваемых усилий на частотах до 10 Гц составляет около 2 дБ для соответствующих отклонений  $L_{0B}$ . По мере роста частоты до 100 Гц отмеченная разница уменьшается. Наибольшие фазовые различия в ФЧХ приходятся на частотный диапазон от 10 до 100 Гц и не превышают  $\pm 5$  град. Изменения в частоте среза (160 Гц) не превышают 6%.

Таким образом, увеличение корректирующего коэффициента до  $K_B = 50$  позволяет существенно снизить выбросы в ПФ из-за изменений  $L_{0B}$  в ВМП. Однако различия в АЧХ и ФЧХ создаваемых усилий в РМП для частотной области от 10 до 100 Гц возрастают в среднем до 5% для соответствующего изменения  $L_{0B}$  на 25%. Характер изменения ПФ приближается к экспоненциальному закону, соответствующему исходному В1.

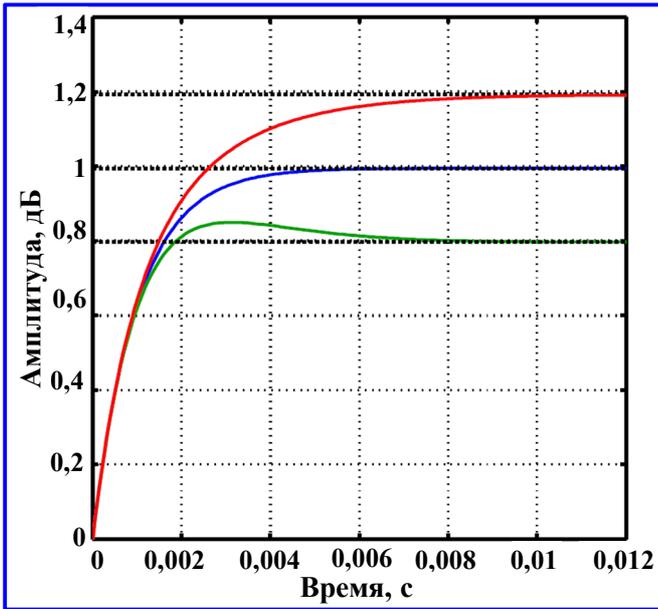


Рис. 8. ПФ для В3 при  $K_B = 50$

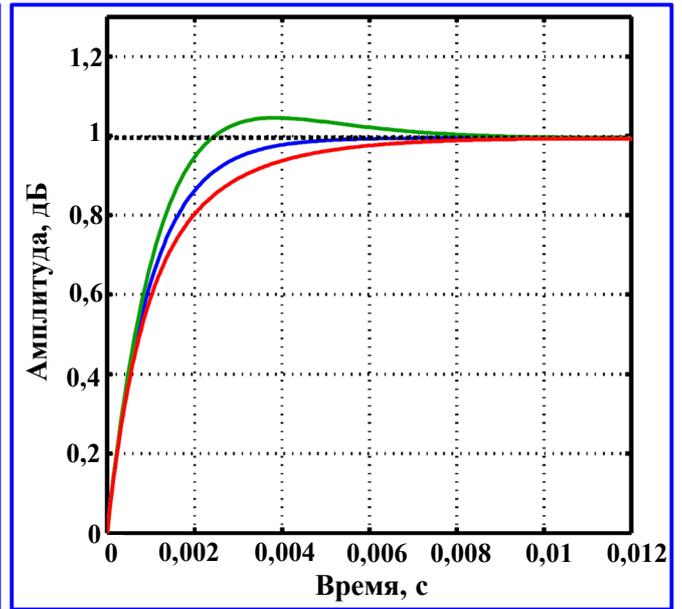


Рис. 10. ПФ магнитного потока РМП при комплексном изменении  $K_B$  и  $K_{OC}$

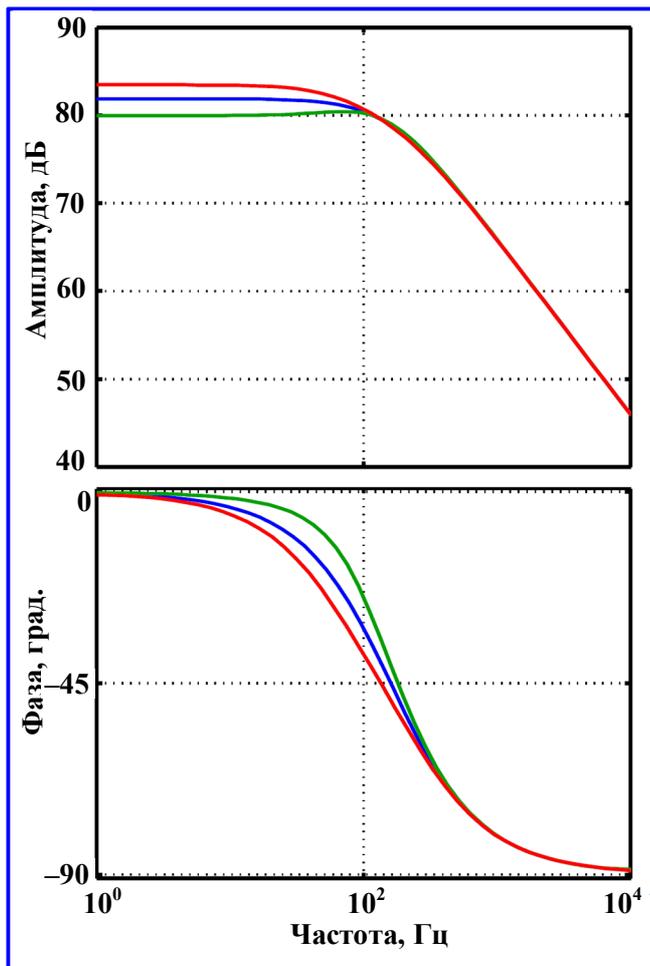


Рис. 9. ЧХ для В3 при  $K_B = 50$

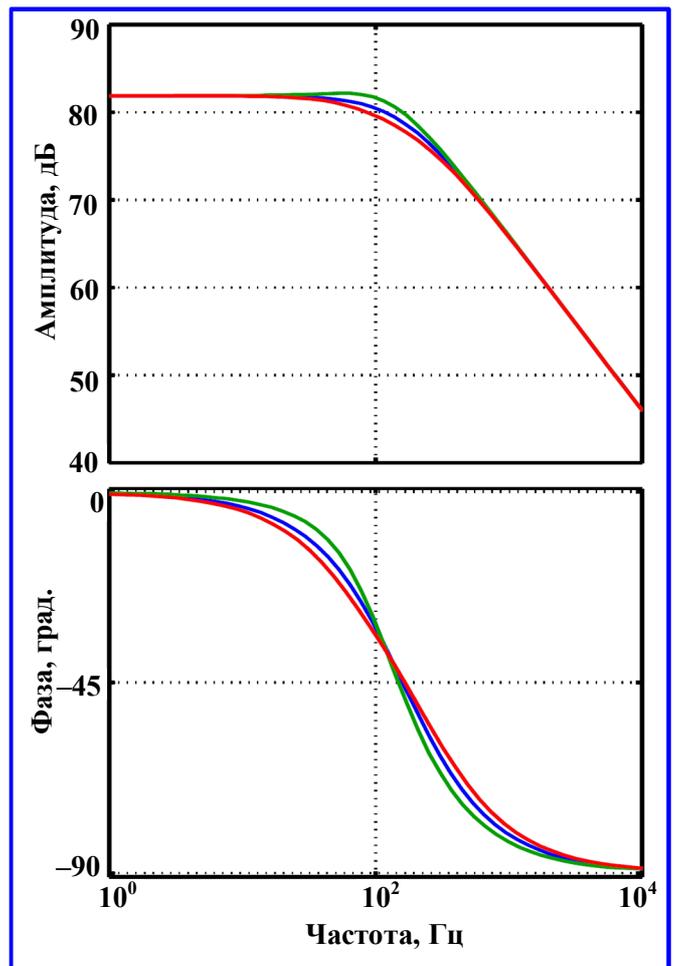


Рис. 11. ЧХ усиления РМП при изменениях  $K_B$  и  $K_{OC}$

Рассмотренные факторы влияния отклонений параметров в ВМП по сравнению с реальным электромагнитом и вопросы выбора коэффициента корректирующей цепи являются важными для решения комплексной задачи разработки системы управления электромагнитным подшипником с обратной связью по магнитному потоку. Представленные здесь частные случаи моделирования динамических процессов не охватывают всех возможных случаев, которые могут встречаться на практике.

В дополнение к полученным результатам моделирования следует рассмотреть комплексное воздействие изменений параметров на систему управления электромагнитом с обратной связью по магнитному потоку. Кроме изменений  $L_{OB}$  и  $K_B$  рассмотрим ещё и влияние коэффициента обратной связи  $K_{OC}$ . В соответствии с формулой (7),  $U_{уст}$  прямо пропорционально  $1/L_{OB}$  и обратно пропорционально  $K_{OC}$ . Попытаемся компенсировать несоответствие индуктивностей с помощью изменения величины коэффициента ОС. В вариантах управления  $1/L_{OB} = 10$  установим  $K_{OC} = 0,8$  вместо 1, а для  $1/L_{OB} = 10$  – соответственно  $K_{OC} = 1,2$ . В этих случаях при значении  $K_B = 50$  получим ПФ для магнитного потока РМП, показанную на рис. 10. Установившиеся значения соответствуют исходному варианту, а в области перелома разбросы сократились примерно на 5% от текущего значения. Характер изменения кривых при различных значениях  $L_{OB}$  практически приблизился к исходным кривым. Соответствующие изменения в усилиях  $F_z$ , создаваемых в РМП, можно оценить по ЧХ для данного случая, показанных на рис. 11. Из этих графиков видно, что кривые для различных вариантов за счёт комплексных изменений коэффициентов практически приблизились к исходным во всем диапазоне рассматриваемых частот.

Следовательно, с использованием комплексного подхода к выбору коэффициентов  $K_B$  и  $K_{OC}$  можно преодолеть различия в динамических свойствах, возникающих из-за отклонений параметров в ВМП по сравнению со значениями в реальном электромагните. В целом характер процессов приближается к процессу в апериодическом звене первого порядка. Это позволяет считать, что рассмотренные ключевые положения для системы управления с обратной связью по магнитному потоку и проведённое моделиро-

вание динамических процессов системы с ВМП являются важным дополнением существующих методов проектирования СМП [5], применяемых в АО «Корпорация «ВНИИЭМ».

### Выводы

1. Анализ передаточных функций системы управления электромагнитом с отрицательной обратной связью по магнитному потоку показывает, что процессы изменения магнитного потока соответствуют апериодическому звену первого порядка с постоянной времени и коэффициентом передачи, которые зависят только от величины усиления и обратной связи системы.

2. В системе управления с применением ВМП из-за отличия его параметров от значений реального электромагнита могут возникать различия в характере ЧХ и переходных характеристик, влияние разбросов в которых можно сократить за счёт изменения корректирующего коэффициента и постоянного коэффициента обратной связи.

3. Рассмотренные методы моделирования имеют универсальный характер и могут быть использованы для систем управления ОМП с массивными магнитопроводами.

### Литература

1. Журавлёв Ю. Н. Активные магнитные подшипники. Теория, расчёт, применение / Ю. Н. Журавлёв. – СПб. : Политехника, 2003. – 206 с.
2. Maslen E. Magnetic Bearings // University of Virginia Department of Mechanical, Aerospace and Nuclear Engineering Charlottesville, Virginia. Revised June 5, 2000. – 229 p.
3. Верещагин В. П., Клабуков В. А. Математическая модель осевого магнитного подшипника с учётом вихревых токов / В. П. Верещагин, В. А. Клабуков // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М. : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2011. – Т. 123. – № 4. – С. 3 – 8.
4. Верещагин В. П., Клабуков В. А., Рогоза А. В. Управление электромагнитными подшипниками с обратной связью по магнитному потоку / В. П. Верещагин, В. А. Клабуков, А. В. Рогоза // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – М. : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2012. – Т. 131. – № 6. – С. 3 – 10.
5. Макриденко Л. А., Сарычев А. П., Абдурагимов А. С., Верещагин В. П., Рогоза А. В. Методы проектирования систем электромагнитных подшипников в АО «Корпорация «ВНИИЭМ» / Л. А. Макриденко и др. // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – М. : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2016. – Т. 152. – № 3. – С. 3 – 14.

Поступила в редакцию 21.06.2017

*Владимир Петрович Верещагин, доктор технических наук, главный научный сотрудник, т. (495) 365-50-73.*

*Ирина Валерьевна Гурова, инженер, т. (495) 366-31-88.  
Александр Валерьевич Рогоза, кандидат технических наук,  
т. (495) 366-04-79.  
E-mail: vniiem@vniiem.ru.  
(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).*

## **SPECIFIC ASPECTS OF CONTROLLING ELECTROMAGNETIC BEARINGS WITH APPLICATION OF MAGNETIC FLUX FEEDBACK**

**V. P. Vereshchagin, I. V. Gurova, A. V. Rogoza**

*The article discusses a control system of radial electromagnetic bearing, implementing a special computer module for computation of magnetic flux signal value (magnetic flux evaluator – MFE) as a feedback tool. Transfer functions of magnetic flux feedback system have been analyzed to provide a basis for obtaining key characteristics of dynamic processes. Processes of controlling electromagnets, using MFE, have been mathematically simulated. Comparison of the system's transient and frequency characteristics demonstrates that errors, potentially resulting from differences between MFE and electromagnet parameters, can be reduced by correcting corresponding transfer coefficients of the system. The results of research also show that developed simulation methods can be applied to control more sophisticated axial electromagnetic bearings using MFE to compute magnetic flux signal value with regard to dissipation fluxes and whirling currents in magnetic cores.*

**Key words:** *electromagnetic bearings, electromagnet control system, magnetic flux evaluator, simulation of control processes, frequency characteristics, transfer functions.*

### **List of References**

1. Zhuravlev Iu. N. Active magnetic bearings. Theoretical principles, calculation methods, applications / Iu.N. Zhuravlev. – St. Petersburg : Politekhnik, 2003. – 206 p.
2. Maslen E. Magnetic Bearings // University of Virginia Department of Mechanical, Aerospace and Nuclear Engineering Charlottesville, Virginia. Revised June 5, 2000. – 229 p.
3. Vereshchagin V. P., Klabukov V. A. Mathematical model of axial magnetic bearing, considering whirling currents / V.P. Vereshchagin, V. A. Klabukov // Issues of Electromechanics. VNIEM Proceedings. – M. : JC «VNIEM Corporation», 2011. – Vol. 123. – Issue 4. – Pp. 3 – 8.
4. Vereshchagin V. P., Klabukov V. A., Rogoza A. V. Control system of electromagnetic bearings with magnetic flux feedback evaluator / V. P. Vereshchagin, V. A. Klabukov, A. V. Rogoza // Issues of Electromechanics. VNIEM Proceedings. – M. : JC «VNIEM Corporation», 2012. – Vol. 131. – Issue 6. – Pp. 3 – 10.
5. Makridenko L. A., Sarychev A. P., Abduragimov A. S., Vereshchagin V. P., Rogoza A. V. VNIEM methods for developing electromagnetic bearings systems / L. A. Makridenko et al. // Issues of Electromechanics. VNIEM Proceedings. – M. : JC «VNIEM Corporation», 2016. – Vol. 152. – Issue 3. – Pp. 3 – 14.

*Vladimir Petrovich Vereshchagin, Doctor of Technical Science (D. Sc.), Chief Researcher,  
tel.: (495)365-50-73.*

*Irina Valerevna Gurova, Engineer, tel.: (495)366-31-88.*

*Alexandr Valerevich Rogoza, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Head of SPC,  
tel.: (495)366-04-79.*

*E-mail: vniiem@vniiem.ru.  
(JC «VNIEM Corporation»).*