

УДК 621.313

УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ПОДШИПНИКАМИ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ПО МАГНИТНОМУ ПОТОКУ

В.П. Верещагин, В.А. Клабуков, А.В. Рогоза
(ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ»)

Рассмотрено управление электромагнитными подшипниками с использованием магнитного потока из «наблюдателя» состояния электромагнита. Проведены сравнения различных типов управления: по току и магнитному потоку электромагнита. Показаны преимущества управления по магнитному потоку. Особенно применительно к электромагнитам с массивным магнитопроводом.

Ключевые слова: электромагнитный подшипник, управление, наблюдатель.

В современных системах электромагнитного подвеса (СМП) для управления электромагнитами (ЭМ) в основном используется отрицательная обратная связь по току, протекающему в обмотках. Такое форсированное управление обеспечивает достаточно высокое быстродействие электромагнитного подшипника (ЭМП), но приводит к ухудшению динамических свойств СМП за счёт роста «отрицательной» позиционной жёсткости в ЭМ. Известное в практике применение для управления ЭМ обратной связи по магнитному потоку в разработках некоторых мировых производителей СМП (например S2M, Франция) осуществляется в ограниченном частотном диапазоне и не позволяет полностью избавиться от отмеченного недостатка.

Вместе с тем, проведённые в ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ» исследования математических моделей (ММ) ЭМ, данные по которым изложены в ранее опубликованных работах [1, 2], показывают, что полученные результаты могут быть использованы для синтеза «наблюдателя» состояния ЭМ, позволяющего охватить более широкий диапазон управляющих воздействий.

Целью данной статьи является исследование процессов управления ЭМ СМП с использованием обратной связи по сигналу магнитного потока, полученному из «наблюдателя» состояния ЭМ, синтезированного на основе разработанных ММ.

Управление СМП в роторных машинах осуществляется за счёт воздействий ЭМ на подвижный ротор. Математическое описание процессов, происходящих при взаимодействии ЭМ и ротора, охватывает механическое движение ротора и электромагнитные процессы, протекающие в электрических и магнитных цепях каждого ЭМ. Исследование процессов в СМП, осуществляющей в общем случае одновременное управление по нескольким степеням свободы движения ротора, является сложной и многосвязной задачей. В связи с этим целесообразно начать с рассмотрения случая управления одиночным ЭМ

(ОЭМ), взаимодействующим с ротором, движущимся по одной из осей. Такой ОЭМ в СМП представляет собой объект управления (ОУ), который в общем виде можно представить звеном, показанным на рис. 1. Входное (управляющее) воздействие в виде напряжения питания U , приложенного к обмотке ОЭМ, приводит к возникновению в нём электромагнитных процессов, которые характеризуются переменными состояниями: потокосцеплением ψ и его производной $\dot{\psi}$, током в обмотке I и перемещением ротора y . Выходной величиной этого звена является тяговое усилие F_m , действующее на ротор со стороны ОЭМ.

Для описания электромагнитных процессов воспользуемся ММ из предыдущей работы [1], включающей систему уравнения электрического и магнитного равновесия и выражение для определения тягового усилия, которые, в первом приближении, имеют следующий вид:

$$\begin{cases} \dot{\psi} = U - IR; \\ \psi = IL(y); \\ F_m = k_f \psi^2, \end{cases} \quad (1)$$

где k_f – постоянный коэффициент; $L(y) = \frac{L_0}{1 - y/a}$ – индуктивность ЭМ при перемещении ротора y ; L_0 – индуктивность ЭМ при зазоре a ($y = 0$); R – активное сопротивление обмотки ЭМ.

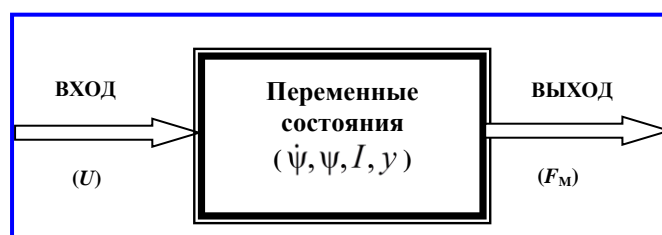


Рис. 1. Общий вид звена ОУ, характеризующего ОЭМ

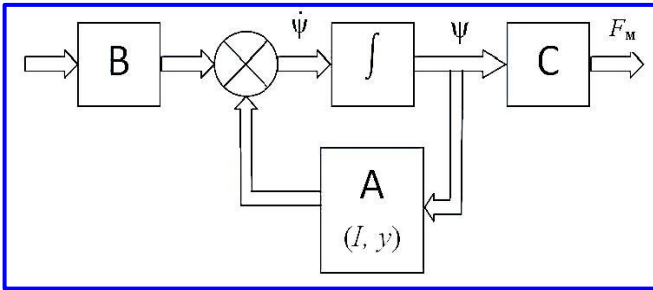


Рис. 2. Структурная схема звена ОЭМ

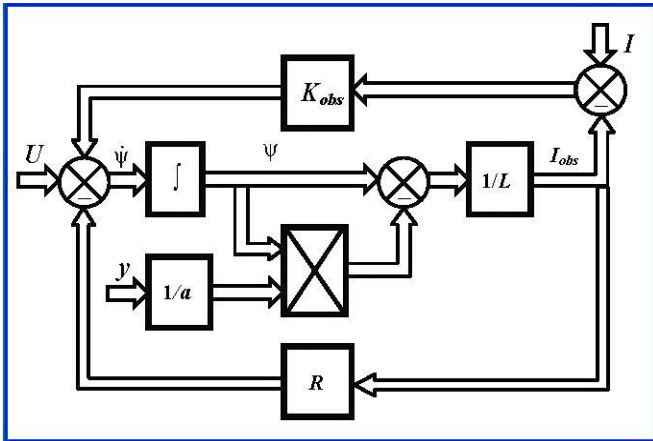


Рис. 3. Структурная схема «наблюдателя» ОЭМ

Система уравнений (1) в нормализованной общей форме записи уравнений состояния ОУ с учётом применяемых способов линеаризации СМП будет иметь вид:

$$\begin{cases} \dot{\psi} = A\psi + BU; \\ F_m = C\psi, \end{cases} \quad (2)$$

где A, B, C – матрицы коэффициентов.

Структурная схема ОЭМ, соответствующая уравнениям (2), показанная на рис. 2, отражает закономерности и связи, определённые системой уравнений (1).

В соответствии с принципами оптимального управления [3, 4] для линейных систем вида:

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BY; \\ Z = DX, \end{cases} \quad (3)$$

где X – вектор состояния; Y – входная переменная; Z – измеряемая переменная; A, B, D – постоянные матрицы; можно считать, что «наблюдателем» полного порядка в общем виде является система уравнений:

$$\dot{X}_{obs} = AX_{obs} + BY + N(Z - DX_{obs}), \quad (4)$$

где N – матрица коэффициентов усиления «наблюдателя».

По аналогии с уравнением (4) из систем уравнений

(1) и (2) можно получить систему уравнений «наблюдателя» для ОЭМ:

$$\begin{cases} \dot{\psi}_{obs} = U - RI_{obs} + k_{obs}(I - I_{obs}); \\ \psi_{obs} = I_{obs} \frac{L_0}{1 - y/a}. \end{cases} \quad (5)$$

Структурная схема «наблюдателя» ОЭМ показана на рис. 3.

Полученная структурная схема с учётом принятых в системе уравнений (1) допущений об отсутствии влияния на процессы полей рассеяния, вихревых токов и изменения магнитного сопротивления магнитопровода представляет собой упрощённую структуру ММ ОЭМ, дополненную обратной связью по разнице токов в обмотке ОЭМ и наблюдателе.

Однако поля рассеяния могут оказывать существенное влияние на электромагнитные процессы в ОЭМ, поэтому необходимо их учесть, введя в уравнение электрического равновесия системы (1) соответствующее слагаемое:

$$\dot{\psi} = U - IR - \dot{I}L_1, \quad (6)$$

где L_1 – индуктивность, соответствующая потокам рассеяния ОЭМ.

Осуществив математические преобразования, описанные выше, можно получить систему уравнений «наблюдателя» для ОЭМ с учётом влияния полей рассеяния:

$$\begin{cases} \dot{\psi}_{obs} = U - RI_{obs} - \dot{I}_{obs}L_1 + k_{obs}(I - I_{obs}); \\ \psi_{obs} = I_{obs} \frac{L_0}{1 - y/a}. \end{cases} \quad (7)$$

Система (7) используется для построения ММ «наблюдателя» для ОЭМ с учётом рассеяния. Структура такой ММ показана на рис. 4.

Выходным параметром модели является магнитный поток «наблюдателя» ψ_{obs} . Параметры «наблюдателя» должны соответствовать параметрам реального ОЭМ. Однако возможные пределы допустимых отклонений этих параметров предполагается установить в дальнейшем.

Проведём сравнения традиционного способа управления ОМП по току и способа управления с «наблюдателем» по магнитному потоку. Структурные схемы управления ОМП для обоих вариантов приведены на рис. 5.

Рассмотрим структуру ММ управления ОЭМ на

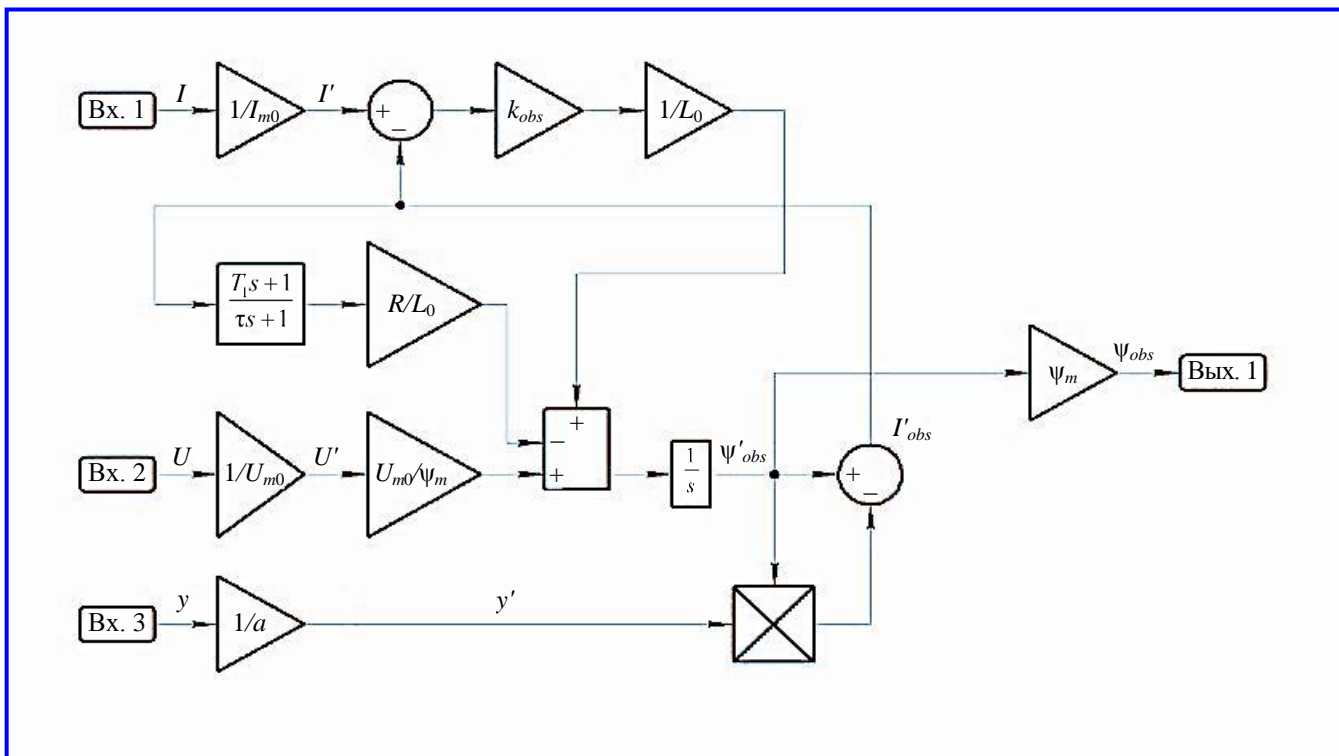
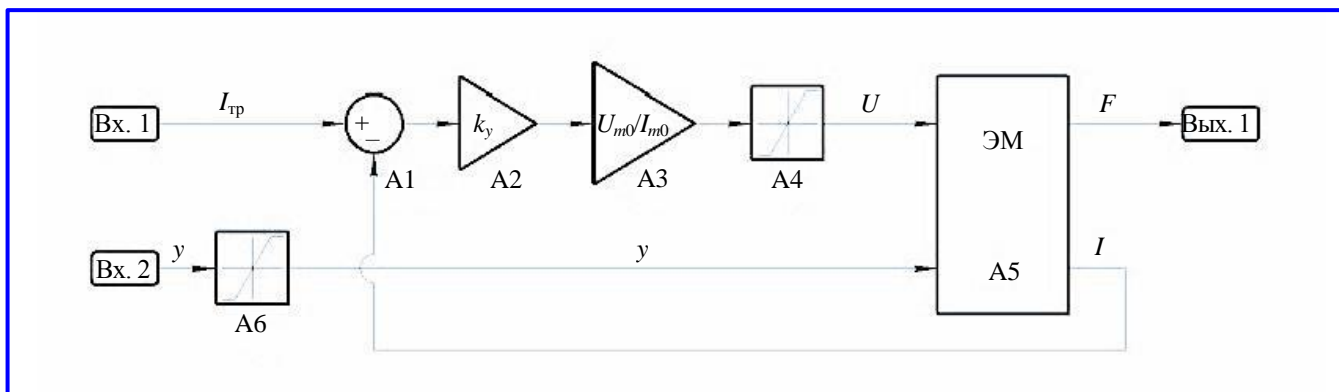
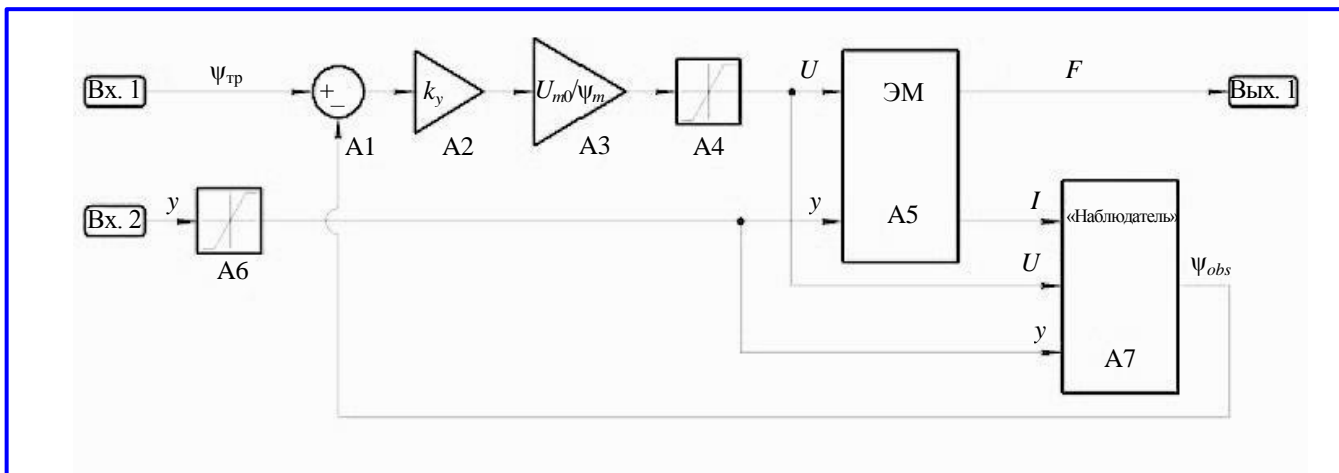


Рис. 4. Структурная схема ММ «наблюдателя» ОЭМ с учётом рассеяния



а



б

Рис. 5. Структурная схема ММ управления ОЭМ: а – с обратной связью по току; б – с обратной связью по потоку

примере традиционной системы с обратной связью по току (рис. 5, а). Из регулятора (в рамках данной работы не рассматривается) на вход системы поступает требуемый ток $I_{тр}$. Далее на сумматоре А1 вычисляется разница между требуемым током $I_{тр}$ и током в обмотке электромагнита I . Полученная разница в звене А2 умножается на коэффициент усиления k_y и поступает в звено А3, где сигнал управления преобразуется в напряжение, а затем проходит через ограничитель А4. В блоке А4 напряжение усилителя ограничивается по модулю максимальным напряжением усилителя U_m . Ограниченное таким образом напряжение U поступает на вход электромагнита А5. На второй вход модели электромагнита подаётся сигнал положения ротора, диапазон изменения которого в звене А6 ограничен страховочным подшипником. Ток I , измеренный в обмотке электромагнита, возвращается в качестве сигнала отрицательной обратной связи на сумматор А1. Выходным параметром ММ ОЭМ является тяговое усилие электромагнита F .

Структура системы управления с обратной связью по потоку (рис. 5, б) во многом схожа с рассмотренной выше ММ ОЭМ. Из регулятора поступает сигнал требуемого значения магнитного потока $\psi_{тр}$, который пройдя через звенья А1 – А4 поступает на вход электромагнита А5. Отличительной особенностью этой ММ ОЭМ является наличие «наблюдателя» А7, на первый вход которого поступает ток I , измеренный в обмотке электромагнита. На второй и третий вход «наблюдателя» поступают напряжение U и сигнал положения ротора y . Рассчитанный в «наблюдателе» магнитный поток ψ_{obs} поступает в сумматор А1.

Параметры модели радиального электромагнита, используемые в дальнейших экспериментах: $F_m = 10\,000$ Н – максимальное тяговое усилие, развиваемое электромагнитом; $U_m = 200$ В – максимальное напряжение усилителя (напряжение насыщения); $a = 0,001$ м – номинальный воздушный зазор в электромагните; $R = 1$ Ом – омическое сопротивление обмотки электромагнита; $L_0 = 0,1$ Гн – индуктивность, соответствующая потоку воздушного зазора при центральном положении ротора; $L_1 = 0,01$ Гн – индуктивность, соответствующая потоку рассеяния.

Коэффициенты усиления: $k_{obs} = 150$; $k_y = 150$.

Для сравнения динамических характеристик описанных выше систем проведём численное моделирование. На вход системы подаётся управляющий сигнал, который после стабилизации переходных процессов влияет на тяговое усилие электромагнита следующим образом:

$$F = F_{const} + F_{\Delta} \sin(\omega t),$$

где F_{const} – постоянная составляющая усилия $F_{const} = F_m$; F_{Δ} – амплитуда переменной составляющей усилия $F_{\Delta} = 0,1F_m$.

Амплитуда переменной составляющей усилия выбрана исходя из условия линейного режима работы усилителя.

Зависимости амплитуды и фазы F_{Δ} от частоты ω колебаний напряжения на входе электромагнита показывают, что частота среза апериодического звена, эквивалентного ОЭМ, при управлениях с обратными связями по току или по магнитному потоку практически сохраняется неизменной и составляет около 150 Гц.

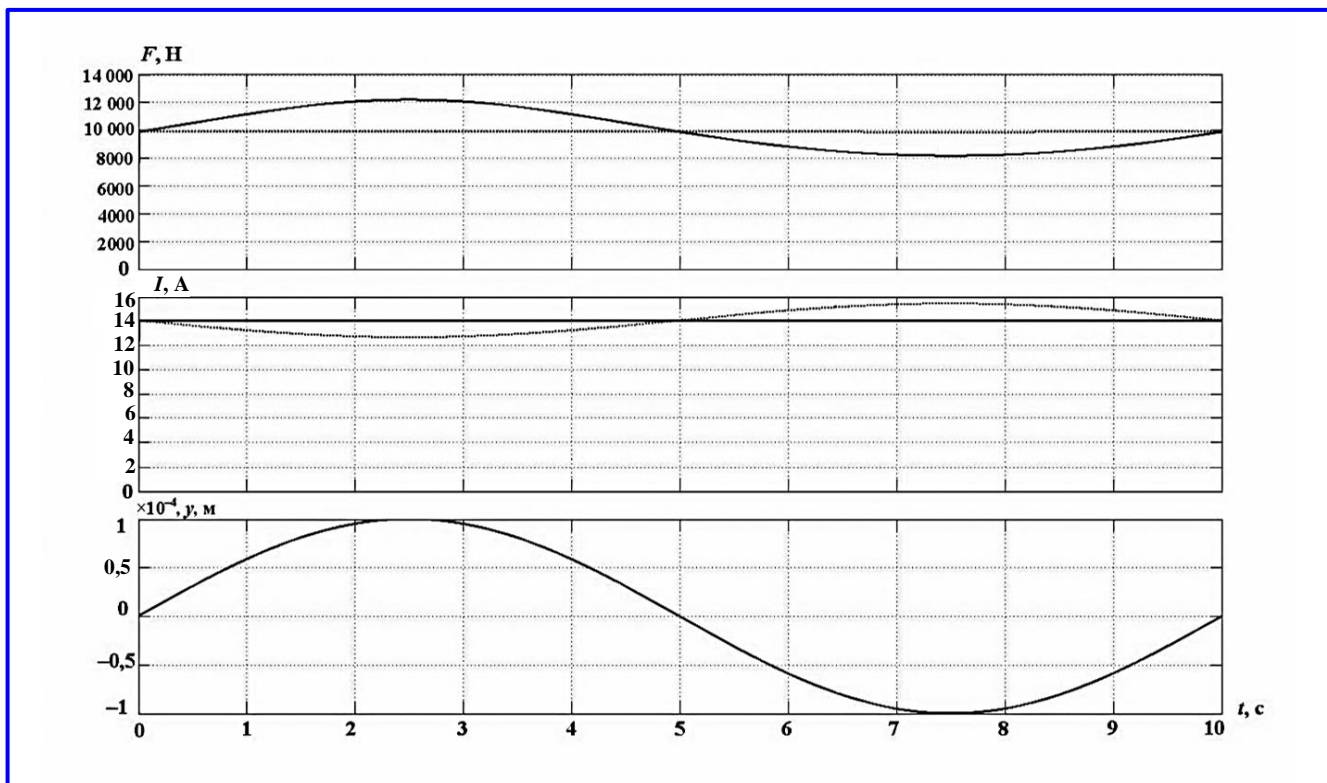
Далее рассмотрим влияние типа обратной связи на отрицательную позиционную жёсткость СМП. Ротор совершает колебательные движения в воздушном зазоре с изменяющейся частотой и определённой амплитудой $y_{\Delta} = 100$ мкм, что составляет 10% воздушного зазора исследуемого электромагнита. Изменения усилия, тока и положения ротора от времени показаны на рис. 6.

При частоте колебаний ротора 0,1 Гц (рис. 6, а) в случае ОЭМ с обратной связью по току возникает переменная составляющая усилия амплитудой $F_{\Delta} = 2014$ Н, что составляет 20,1% от максимального усилия F_m . Отрицательная позиционная жёсткость

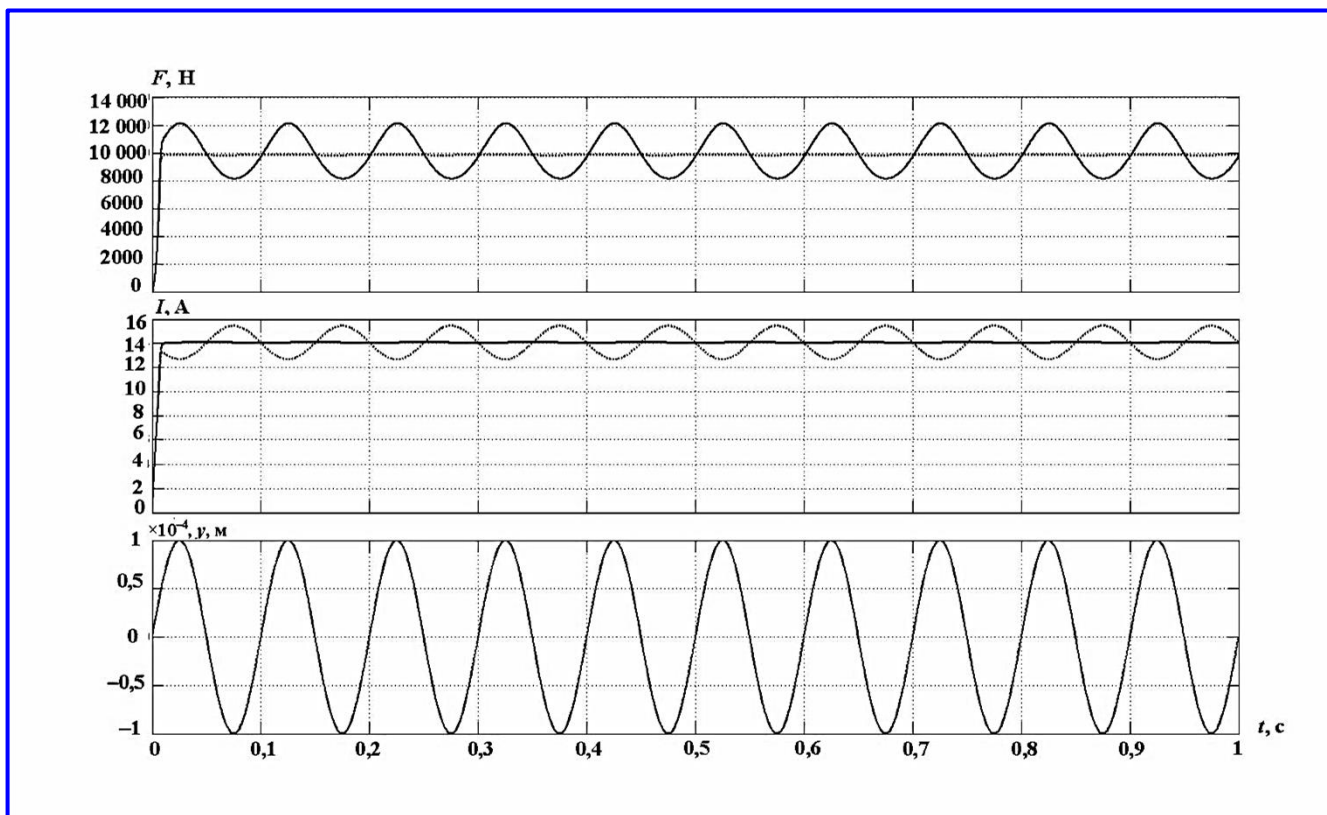
$$c_y = \frac{F_{\Delta}}{y_{\Delta}} = \frac{2014}{100} = 20,1 \text{ Н/мкм.}$$

Даже с увеличением частоты колебаний ротора до 10 Гц (рис. 6, б) применение обратной связи по току приводит к тому, что противоЭДС электромагнита практически полностью компенсируется изменением напряжения на обмотке электромагнита, и ток остаётся постоянным. В результате этого амплитуда колебаний тягового усилия и, соответственно, значение отрицательной позиционной жёсткости практически остаются прежними, как при частоте 0,1 Гц: $F_{\Delta} = 2011$ Н, $c_y = 2011/100 = 20,1$ Н/мкм.

Такое влияние обратной связи по току вызывает значительные трудности в управлении СМП. Высокое значение позиционной жёсткости вынуждает применять в системе управления (регуляторе) специальные меры для компенсации этого недостатка ЭМ. В случае управления ОЭМ по магнитному потоку данная проблема не возникает, так как пока усилитель работает в линейном режиме, перемещения ротора не влияют на величину тягового усилия, и отрицательная позиционная жёсткость равна нулю.



a



b

Рис. 6. Изменение усилия, тока и положения ротора во времени: a – при частоте 0,1 Гц; б – при частоте 10 Гц; ----- с обратной связью по току; с обратной связью по потоку

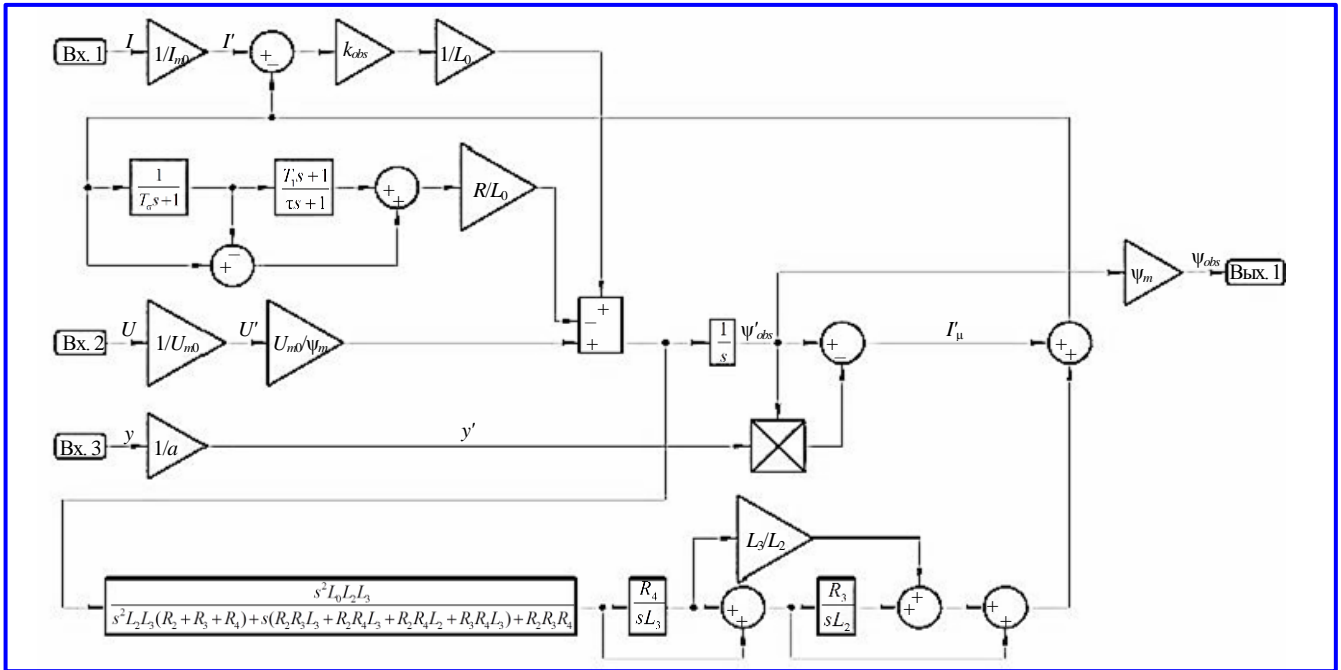
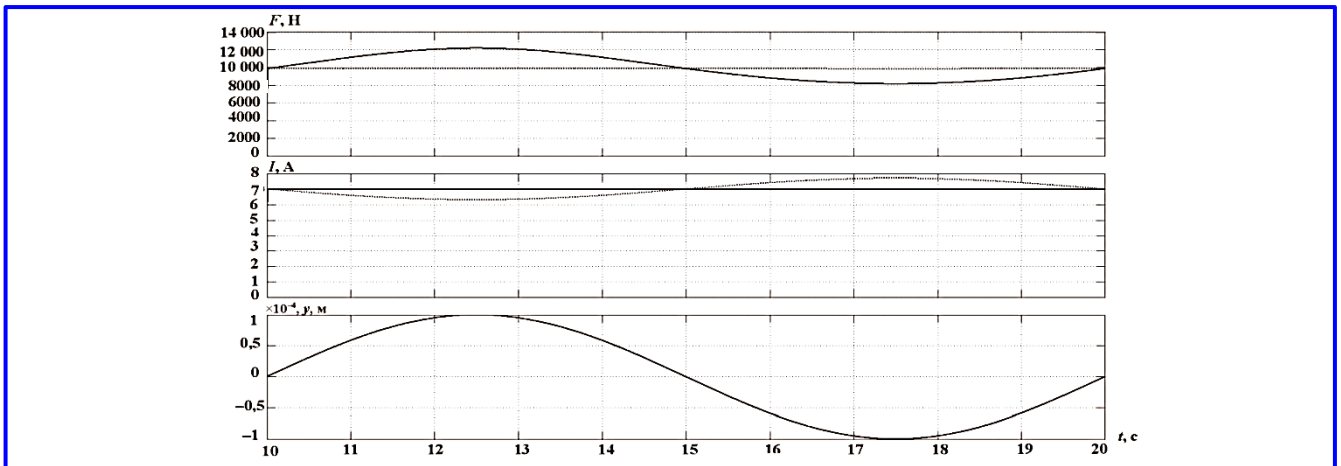
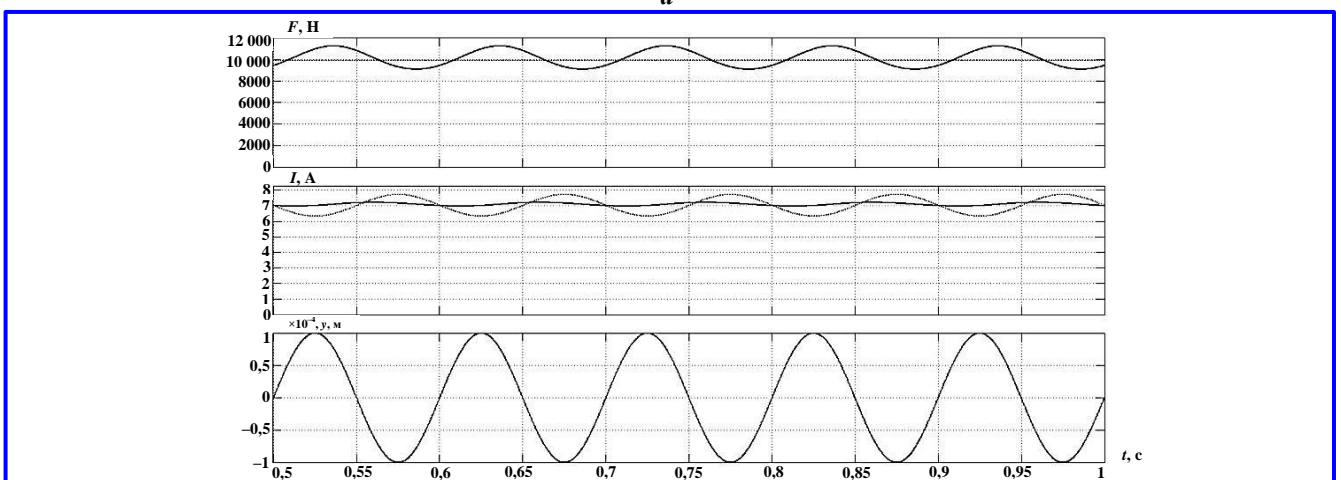


Рис. 7. Структурная схема ММ «наблюдателя» с учётом влияния вихревых токов и изменения магнитного сопротивления магнитопровода



a



b

Рис. 8. Изменение усилия, тока и положения ротора во времени: а – при частоте 0,1 Гц; б – при частоте 10 Гц; ----- с обратной связью по току; ... – с обратной связью по потоку

Введение обратной связи по потоку позволяет поддерживать практически постоянный уровень тягового усилия за счёт изменения тока (в пределах 10% от установившегося значения).

Использование обратной связи по магнитному потоку в осевом магнитном подшипнике (ОМП) позволяет получить значительно больший эффект, чем в радиальном МП.

Как было показано в предыдущей работе [2], на электромагнитные процессы в ОМП значительное влияние оказывают вихревые токи и изменение магнитного сопротивления магнитопровода. В статье [2] также была предложена ММ ОМП с учётом влияния указанных факторов. На основе этой ММ можно построить «наблюдатель», учитывающий влияние вихревых токов и изменение магнитного сопротивления магнитопровода. Структурная схема ММ такого «наблюдателя» представлена на рис. 7.

Структурные схемы ОМП полностью соответствуют приведённым на рис. 5. Параметры модели ОМП, используемые в дальнейших экспериментах:

$F_m = 10\ 000\ \text{Н}$; $a = 0,001\ \text{м}$; $R = 2\ \text{Ом}$; $L_0 = 0,4\ \text{Гн}$; $L_1 = 0,02\ \text{Гн}$; $R_1 = 45,9\ \text{Ом}$; $R_2 = 20,5\ \text{Ом}$; $R_3 = 54,3\ \text{Ом}$; $R_4 = 91,7\ \text{Ом}$; $L_2 = 0,196\ \text{Гн}$; $L_3 = 0,074\ \text{Гн}$; $k_{obs} = 150$; $k_y = 150$.

Полученные АЧХ и ФЧХ ОМП с различным типом управления показывают, что в исследуемом диапазоне имеется значительное различие по частоте среза. В ОМП с управлением по току частота среза не более 20 Гц. При использовании управления ОМП по потоку частота среза достигает 95 Гц. Таким образом, применение управления по магнитному потоку позволяет значительно расширить частотный диапазон работы ОМП.

Рассмотрим влияние типа обратной связи на отрицательную позиционную жёсткость ОМП. Изменения усилия, тока и положения ротора во времени после завершения переходных процессов включения ОМП показаны на рис. 8.

При частоте колебаний ротора 0,1 Гц (рис. 8, а) в случае электромагнита с обратной связью по току возникает переменная составляющая усилия амплитудой $F_\Delta = 2035\ \text{Н}$, что составляет 20,4% от максимального усилия F_m . Отрицательная позиционная жёсткость ОМП с обратной связью по току

$$c_y = \frac{F_\Delta}{y_\Delta} = \frac{2035}{100} = 20,4\ \text{Н/мкм}.$$

Введение обратной связи по потоку позволяет поддерживать постоянный уровень тягового усилия за счёт изменения тока (в пределах 10% от установившегося значения).

Увеличение частоты колебаний ротора до 10 Гц (рис. 8, б) приводит к тому, что в СМП с обратной связью по току противоЭДС электромагнита частично компенсируется изменением напряжения на обмотке электромагнита, и амплитуда изменений тока очень мала и составляет 2% от установившегося значения. Соответственно изменения тягового усилия и отрицательная позиционная жёсткость составляют: $F_\Delta = 1080\ \text{Н}$, $c_y = 1080/100 = 10,8\ \text{Н/мкм}$.

В случае управления ОМП по магнитному потоку усилие остаётся постоянным во всём диапазоне линейной работы усилителя.

Выводы

Управление ЭМП с использованием обратной связи по магнитному потоку на основе «наблюдателя» состояния процессов в электромагнитах позволяет устранить недостатки, присущие известным способам управления по току или сигналу измерительной катушки, расположенной в электромагните.

При этом сохраняются все положительные свойства известных способов: высокого быстродействия при управлении по току и устранение фазовых запаздываний между током и магнитным потоком при управлении с измерительной катушкой.

Однако недостатки этих способов, связанные с необходимостью применения устройств компенсации «отрицательной позиционной жёсткости» при управлении по току и сложности с передачей слабого сигнала измерительной катушки, расположенной в электромагните, к электронной аппаратуре, могут быть устранены при использовании в качестве обратной связи сигнала магнитного потока, полученного из ММ «наблюдателя» состояния электромагнитов.

Литература

1. Математическая модель магнитного подшипника / В. П. Верещагин, В. А. Клабуков // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М. : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2009. – Т. 112. – № 5. – С. 17 – 22.
2. Математическая модель осевого магнитного подшипника с учётом вихревых токов/ В. П. Верещагин, В. А. Клабуков // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М. : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2011. – Т. 123. – № 4. – С. 3 – 8.

3. Квакернаак Х., Сиван Р. Линейные оптимальные системы управления / Х. Квакернаак, Р. Сиван. – М. : Мир, 1977. – 650 с.

4. Журавлев Ю. Н. Активные магнитные подшипники: Теория, расчёт, применение / Ю. Н. Журавлев. – СПб. : Политехника, 2003. – 206 с.

Поступила в редакцию 13.12.2012

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

Владимир Александрович Клабуков, аспирант, начальник лаборатории,
т. (495) 366-35-65.

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

E-mail: vniiem@vniiem.ru.