

## УПРАВЛЕНИЕ ОСЕВЫМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ПОДШИПНИКАМИ С ВЫЧИСЛИТЕЛЕМ МАГНИТНОГО ПОТОКА

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

*Рассмотрена система управления осевым электромагнитным подшипником (ОМП) с массивным магнитопроводом, в котором возникают вихревые токи, оказывающие негативное влияние на динамические процессы управления усилием. Учёт вихревых токов в структуре вычислителя сигнала вычислителя магнитного потока (ВМП), используемого в обратной связи системы, позволяет существенно повысить быстродействие по сравнению с традиционным управлением, использующим обратную связь по току в обмотке. Результаты математического моделирования процессов управления ОМП свидетельствуют о приемлемой для практических целей точности при включении в структуру ВМП дополнительного апериодического звена первого порядка, учитывающего воздействие вихревых токов в магнитопроводе. Сравнение переходных и частотных характеристик для виртуального ОМП близко к образцам, применяемым в газоперекачивающих агрегатах ГПА-16, показывает, что применение в управлении разработанного ВМП повышает быстродействие ОМП примерно в два раза относительно традиционного управления по току в обмотке.*

**Ключевые слова:** осевые электромагнитные подшипники, массивный магнитопровод, вихревые токи, вычислитель магнитного потока, моделирование процессов управления, переходные и частотные характеристики.

Специфика управления осевыми магнитными подшипниками (ОМП) обусловлена применением в них массивных магнитопроводов. Это создаёт трудности в использовании наиболее распространённого на практике традиционного способа управления ОМП с обратной связью по току, протекающему в обмотке электромагнита, так как создаваемое усилие и ток в этом случае могут существенно отличаться по фазе из-за вихревых токов, возникающих в массивном магнитопроводе. Исследованию данных динамических процессов посвящён ряд научных работ по асинхронным машинам с массивным ротором [1] и по управлению ОМП с массивным магнитопроводом [2], в которых рассмотрены возможные пути преодоления указанных сложностей. В основе наиболее эффективного решения лежит применение управления с обратной связью по магнитному потоку в зазоре между статором и ротором [3]. Однако среди известных способов получения сигнала магнитного потока предпочтение следует отдать применению вычислителя сигнала магнитного потока (ВМП) [4]. В разработках АО «Корпорация «ВНИИЭМ» для решения этой задачи рассматривается применение специального ВМП.

Целью данной статьи является исследование процессов управления ОМП с применением универсального ВМП, позволяющего учесть влияние вихревых токов массивного магнитопровода. Задача решается путём моделирования в стандартной компьютерной программе Matlab Simulink процессов управления ОМП с использованием математических моделей, описывающих с достаточной степенью

точности протекающие электромагнитные процессы в ферромагнитных массивных магнитопроводах.

В соответствии с основополагающими подходами, применяемыми в электромеханике для анализа асинхронных машин с массивными роторами, некоторые положения имеют общий характер и могут быть применены в ОМП. В частности, для оценки влияния процессов распространения переменного магнитного потока в магнитопроводе ОМП можно использовать понятие комплексного магнитного сопротивления или соответствующие электрические параметры приведённых к статорной обмотке активного  $R_2$  и индуктивного  $X_2$  сопротивлений, характеризующих процессы перемагничивания массивного магнитопровода. По аналогии с процессами, протекающими в массивном ферромагнитном роторе машины [1], для массивного магнитопровода ОМП можно принять следующие закономерности:

1. Соотношение между индуктивным и активным сопротивлениями массивного магнитопровода не зависит от частоты перемагничивания и свойств ферромагнитного материала, применяемого для магнитопровода. Принятое соотношение характеризуется постоянной величиной, составляющей 0,6, т. е.  $X_2/R_2 = 0,6$ .

2. Для линейного участка кривой намагничивания материала магнитопровода, характерной для работы большинства ОМП, можно считать, что величина указанных сопротивлений  $R_2$  и  $X_2$  зависит от частоты перемагничивания  $f$  следующим образом:

$$R_2(f) = R_{21}f^{0,5}, X_2(f) = X_{21}f^{0,5}, L_2(f) = L_{21}f^{-0,5},$$

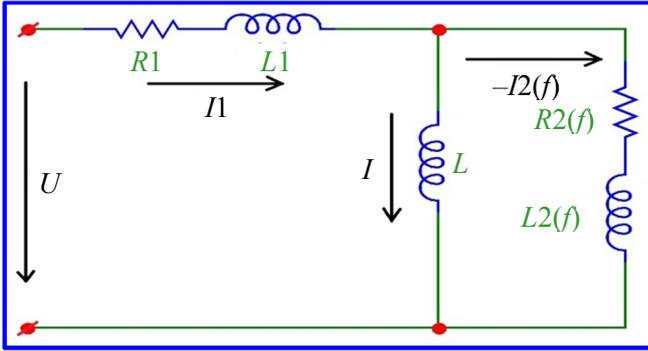


Рис. 1. Электрическая схема замещения ОМП

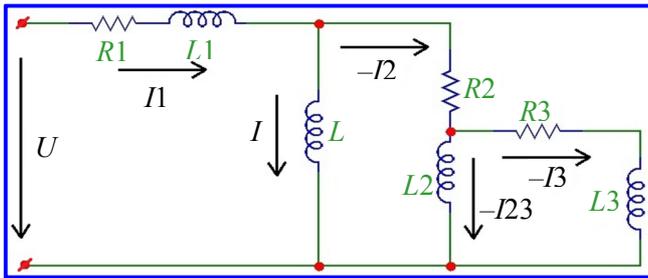


Рис. 2. Аппроксимированная электрическая схема замещения ОМП

где  $R_{21}$ ,  $X_{21}$  и  $L_{21}$  – величины при  $f = 1$  Гц.

Величина сопротивлений уменьшается с ростом частоты. Она обратно пропорциональна корню квадратному из значения частоты.

С учётом отмеченных особенностей ОМП его электрическая схема замещения может быть представлена в виде, показанном на рис. 1.

К известной схеме радиального электромагнитного подшипника (РМП), рассмотренной ранее в [2], добавлена цепь с параметрами  $R_2$  и  $L_2$ , характеризующими влияние вихревых токов в массивном магнитопроводе. Следует отметить, что, как указано выше, параметры этой цепи нелинейно зависят от частоты питающего напряжения  $U$ . Исходные уравнения для описания электромагнитных процессов, с учётом допущений по линейности, принятых для магнитопровода, можно представить в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} U &= \frac{d\psi}{dt} + R_1 I_1 + L_1 \frac{dI_1}{dt} \\ I_1 &= I - I_2 \\ \frac{d\psi}{dt} &= -I_2 R_2 - L_2 \frac{dI_2}{dt} \\ R_2 &= R_{21} f^{0,5} \\ L_2 &= L_{21} f^{-0,5} \\ \psi &= LI, \quad L = \frac{L_0}{1 - X'} \\ F_{\vartheta} &= K_f \psi^2, \quad K_f = \frac{1}{2aL_0} \end{aligned} \right\} (1)$$

Однако при работе со схемой замещения (рис. 1) и исходными уравнениями (1) возникают сложности, связанные с частотной зависимостью параметров. Вычислить частоту  $f$  в реальной системе невозможно, также невозможно и моделирование её изменения в стандартной компьютерной программе Matlab Simulink. Для решения этой проблемы в первом приближении для ограниченного диапазона частот до 200 Гц заменим схему (рис. 1) на аппроксимированную схему, показанную на рис. 2.

Проведённые в АО «Корпорация «ВНИИЭМ» исследования ОМП для газоперекачивающих агрегатов (ГПА), рассмотренные в [4], подтверждают приемлемую для практических целей адекватность такого представления схемы замещения.

В качестве примера рассмотрим виртуальный ОМП, который близок к одному из разработанных для ГПА-16, имеющий следующие параметры:

- активное сопротивление обмотки с учётом соединительного кабеля  $R_1 = 2,0$  Ом;
- индуктивность, соответствующая магнитному потоку в зазоре при центральном положении ротора,  $L_0 = 0,4$  Гн;
- индуктивность, соответствующая потоку рассеяния,  $L_1 = 0,02$  Гн;
- зазор между статором и ротором  $a = 1 \cdot 10^3$  м;
- активное сопротивление и индуктивность, соответствующие цепи вихревых токов в магнитопроводе при частоте 1 Гц,  $R_{21} = 7$  Ом и  $L_{21} = 0,7$  Гн.

Исходные уравнения для аппроксимированной схемы замещения ОМП могут быть представлены в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} U &= \frac{d\psi}{dt} + R_1 I_1 + L_1 \frac{dI_1}{dt} \\ I_1 &= I - I_2; \quad I_2 = I_{23} + I_3 \\ \frac{d\psi}{dt} &= -I_2 R_2 - L_2 \frac{dI_2}{dt} \\ -L_2 \frac{dI_2}{dt} &= -I_3 R_3 - L_3 \frac{dI_3}{dt} \\ \psi &= LI, \quad L = \frac{L_0}{1 - X'} \\ F_{\vartheta} &= K_f \psi^2, \quad K_f = \frac{1}{2aL_0} \end{aligned} \right\}$$

Для параметров цепей, характеризующих влияние массивного магнитопровода ОМП в схеме замещения рис. 2, приняты следующие значения:  $R_2 = 75$  Ом;  $L_2 = 0,2$  Гн;  $R_3 = 300$  Ом;  $L_3 = 0,05$  Гн.

В соответствии с уравнениями (2) разработана структурная схема математической модели ОМП (МОМП), показанная на рис. 3. По сравнению с аналогичной схемой РМП, рассмотренной ранее в [4], добавлены звенья, показанные на рис. 3 синим цветом, которые учитывают влияние вихревых токов магнитопровода в соответствии с аппроксимированной схемой рис. 2 и значениями параметров для виртуального ОМП.

Рассмотрим управление МОМП для двух случаев:

- во-первых, с традиционным управлением с обратной связью по току  $I_1$ ;
- во-вторых, с использованием в обратной связи сигнала магнитного потока  $U_{МП}$ .

Структурная схема управления МОМП, показанная на рис. 4, содержит подсистему МОМП, в которой входное напряжение питания  $U$  формируется в результате усиления с коэффициентом  $K_y$  разницы между входным сигналом  $U_{ВХ}$  и сигналом обратной связи  $U_{ОС}$ . Этот сигнал пропорционален коэффициенту обратной связи  $K_{ОС}$  и значениям  $I_1$  и  $U_{МП}$ , выбранным в зависимости от рассматриваемого типа управления. Положение переключателя «П» изменяется соответственно: 1 – при управлении по сигналу магнитного потока ( $U_{МП}$ ); 2 – по току ( $I_1$ ).

Оценка динамических свойств для рассматриваемых типов управления осуществляется по переходным (ПХ) и частотным характеристикам (АФЧХ) для центрального положения ротора ( $X_p = 0$ ) и воздействии постоянного сигнала  $U_{ВХ} = 0,35$  В. Значения  $K_{ОС}$  выбраны соответственно для обеспечения одинаковых выходных усилий  $F_3$ . Указанные выше характеристики снимались для переменной составляющей усилия  $F_3$ .

Следует отметить, что обычно ОМП подвергается комплексному воздействию постоянного и переменного усилия. При оценке динамических свойств рассматривается отдельно постоянная и переменная составляющие усилия. Правомерность такого подхода справедлива только при относительно малых значениях  $F_3$  по сравнению с постоянной составляющей. Кроме того, величина  $F_3$  зависит от постоянной составляющей. В соответствии с этим в схеме МОМП предусмотрены цепи, показанные на рис. 3 тонкими линиями, которые используются для снятия ПХ и ЧХ.

ПХ, показанные на рис. 5, в первом приближении соответствуют экспоненциальному закону изменения усилия. Постоянная времени при управлении по магнитному потоку (ПХ на рис. 5 обозначена синим цветом) примерно в два раза меньше, чем при управлении по току (ПХ на рис. 5 обозначена зелёным цветом). Соответственно, частота среза по

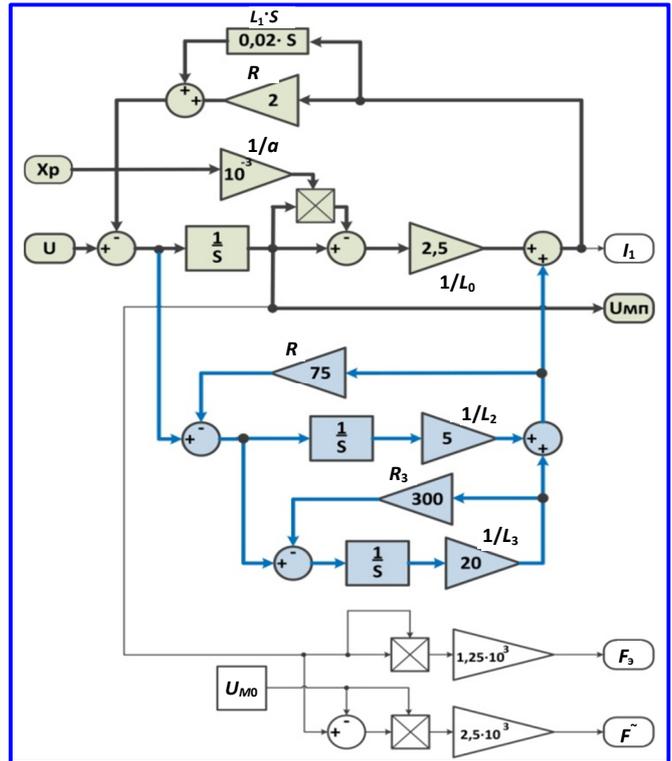


Рис. 3. Структурная схема МОМП

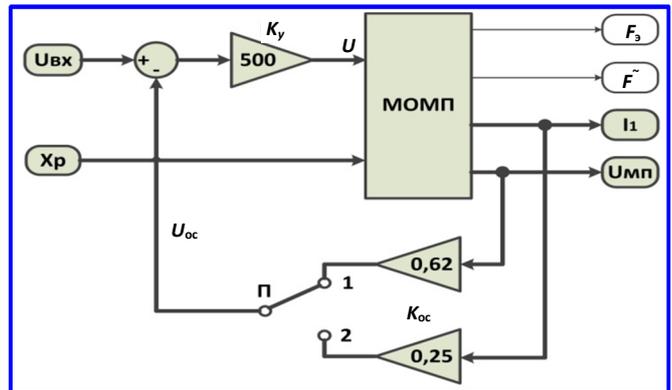


Рис. 4. Структурная схема управления МОМП

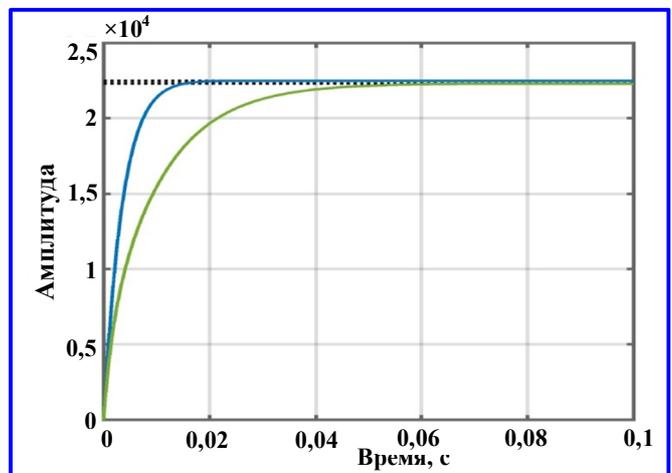


Рис. 5. ПХ при управлении МОМП: по МП (синий), по току (зелёный)

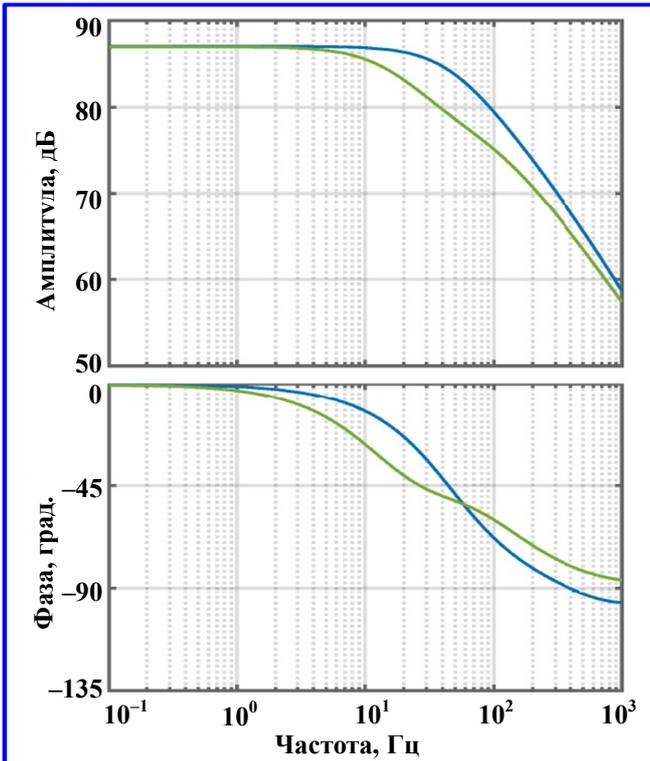


Рис. 6. АФЧХ при управлении МОМП: по МП (синий), по току (зелёный)

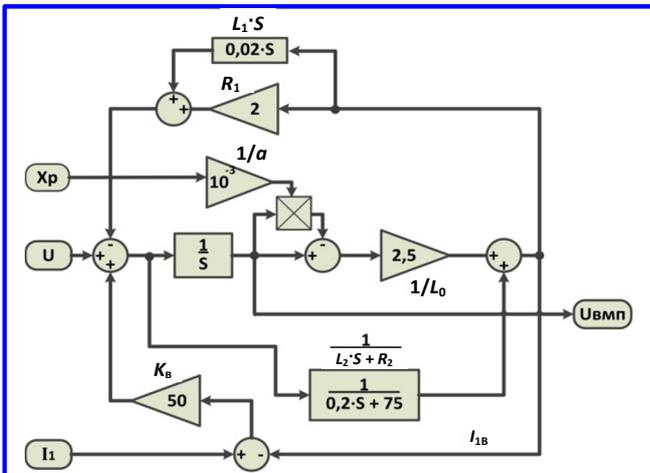


Рис. 7. Структурная схема МВМП

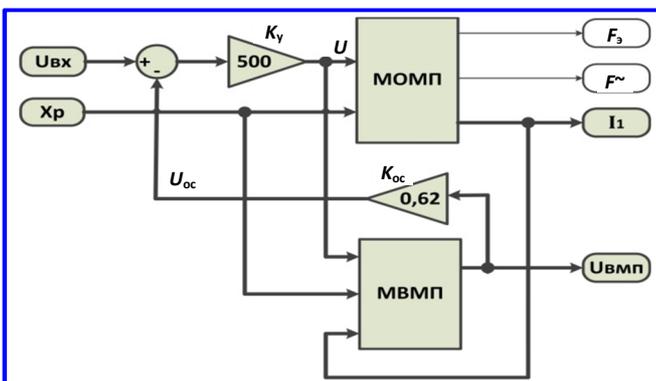


Рис. 8. Структурная схема МСОМП

АФЧХ, показанным на рис. 6, получается при управлении по магнитному потоку почти в два раза выше по сравнению с традиционным управлением по току, протекающему в обмотке ОМП. Это позволяет сделать вывод о предпочтительном управлении с обратной связью по магнитному потоку.

С практической точки зрения, известные способы непосредственного получения сигнала магнитного потока с помощью измерительной катушки имеют существенные недостатки, включая необходимость передачи сигнала от механического блока

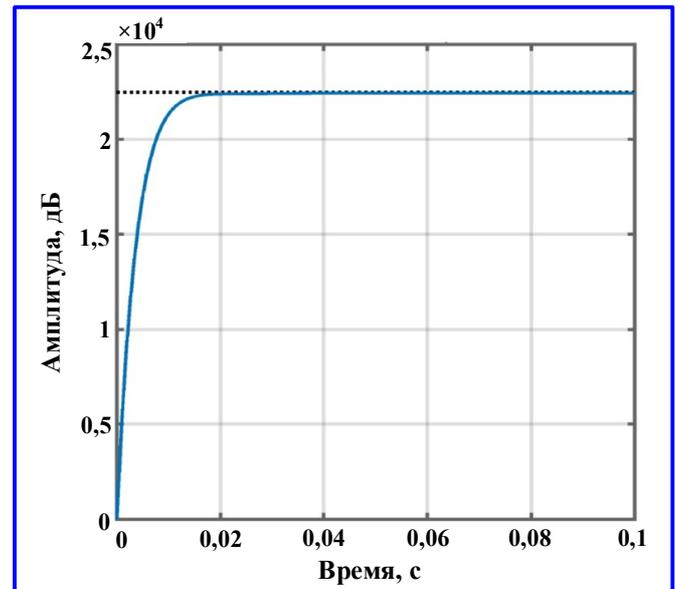


Рис. 9. ПХ для СОМП с МВМП

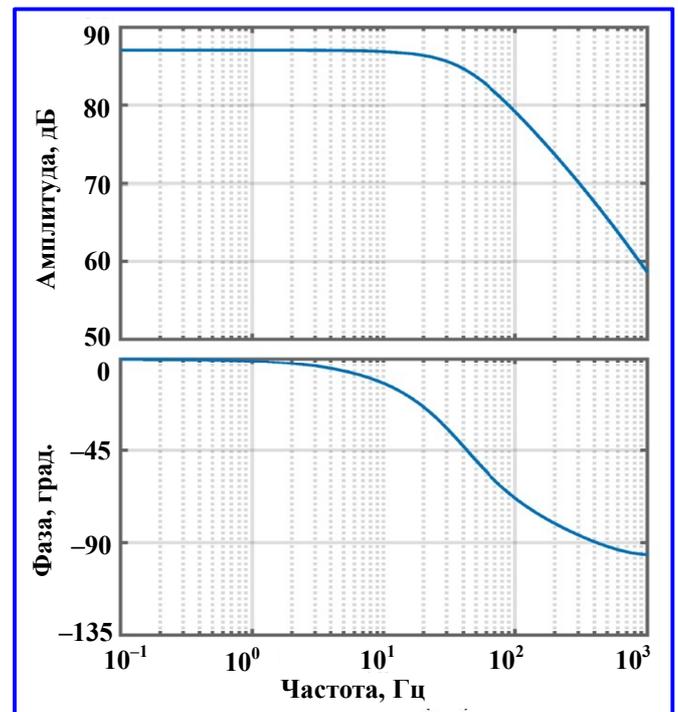


Рис. 10. АФЧХ для СОМП с МВМП

к аппаратуре управления. Возможность использования для этой цели математического ВМП уже рассматривалась в ряде разработок АО «Корпорация «ВНИИЭМ», некоторые результаты которых представлены в публикации [4]. Предлагаемые структурные схемы ВМП получились громоздкими и требовалось их уточнение. С этой целью разработана структурная схема ВМП (МВМП), показанная на рис. 7. В цепи, учитывающей вихревые токи в массивном магнитопроводе ОМП, включено простое апериодическое звено первого порядка с параметрами  $L_2$  и  $R_2$ , соответствующими только первой цепи в МОМП. Кроме того, по сравнению со структурной схемой МОМП добавлена цепь коррекции тока  $I_{1B}$  в ВМП с коэффициентом  $K_B$ , учитывающая его возможные отклонения от фактического  $I_1$  в обмотке ОМП. Для управления используется выходной сигнал  $U_{ВМП}$ , соответствующий магнитному потоку в роторе ОМП.

Для моделирования динамических процессов управления ОМП с использованием ВМП в структурной схеме модели системы управления (МСОМП), показанной на рис. 8, отражены соединения между подсистемами МОМП и МВМП, представленными на рис. 3 и 7.

При моделировании динамических процессов управления в МСОМП снимались ПХ и АФЧХ, которые сравнивались с аналогичными характеристиками для изображённого на рис. 4 случая управления МОМП с использованием в обратной связи её собственного сигнала магнитного потока. Судя по ПХ и АФЧХ для МСОМП, показанным соответственно на рис. 9 и 10, управление с использованием сигнала магнитного потока из МВМП, имеющей более простую структуру, чем у МОМП, позволяет получить результаты, практически совпадающие с рассмотренным выше управлением МОМП с использованием собственного сигнала магнитного потока (рис. 5 и рис. 6). Следует обратить внимание, что при таком использовании в управлении сигнала магнитного потока можно существенно повысить быстродействие и компенсировать негативное влияние вихревых токов в СОМП.

Полученные результаты моделирования для виртуального ОМП, подобно образцам, применяемым в разработках АО «Корпорация «ВНИИЭМ» для газоперекачивающих агрегатов ГПА-16, могут быть использованы в аналогичных и перспективных разработках электромагнитных подшипников, имеющих массивные магнитопроводы.

### Выводы

1. При управлении ОМП, имеющими массивные магнитопроводы, для устранения негативного влияния возникающих вихревых токов целесообразно в обратной связи использовать сигнал магнитного потока, протекающего в роторе.

2. Для получения сигнала магнитного потока разработана математическая модель вычислителя, позволяющая учесть влияние вихревых токов в магнитопроводе.

3. Проведённое моделирование динамических процессов управления ОМП с использованием разработанного вычислителя показывает, что принятые упрощения вычислителя не приводят к существенным отличиям в динамических характеристиках.

4. Разработанные математические модели и полученные результаты могут быть использованы при создании вычислителей магнитного потока для управления электромагнитными подшипниками с магнитопроводами различных типов.

### Литература

1. Куцевалов В. М. Вопросы теории и расчёта асинхронных машин с массивными роторами / В. М. Куцевалов // М. – Л. : Изд. Энергия. – 1966. – 304 с. : с ил.
2. Математическая модель осевого магнитного подшипника с учётом вихревых токов / В. П. Верещагин, В. А. Клабуков // Вопросы электромеханики. Труды НИИ ВНИИЭМ. – М., 2011 – Т. 123. – № 4. – С. 3 – 8.
3. Патент США № 4308490 от 29.12.1981. Device for compensating the gain of a servo-controlled circuit by negative current feedback // Habermann et al. – SEP. France 15.02.1979.
4. Управление электромагнитными подшипниками с обратной связью по магнитному потоку / В. П. Верещагин, В. А. Клабуков, А. В. Рогоза // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – М., 2012. – Т. 131. – № 6. – С. 3 – 10.

Поступила в редакцию 30.10.2017

**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, начальник НИИ, т. (495) 366-04-79.

**Александр Васильевич Спириин**, кандидат технических наук, ведущий специалист, т. (495) 366-26-10.

E-mail: vniiem@vniiem.ru.  
(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

## CONTROL OF AXIAL ELECTROMAGNETIC BEARINGS WITH MAGNETIC FLUX CALCULATORS

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

The article deals with the control system of an axial electromagnetic bearing (AEB) with a solid iron core in which eddy currents appear; these currents negatively influence the dynamic processes of force control. Consideration of eddy currents in the structure of the signal calculator of the magnetic flux calculator (MFC) used in system feedback ensures a significant increase in operating speed as compared to the traditional control using current feedback in the winding. The results of mathematical modeling of AEB control processes demonstrate that the accuracy sufficient for practical purposes is achieved, when an additional first order lag block allowing for the influence of eddy currents in the magnetic circuit is included in the MFC structure. The comparison of transient and frequency characteristics of the virtual AEB with those of equipment used in the GPA-16 gas pumping units shows that the application of the designed MFC for control ensures that the AEB operating speed increases by two times approximately with respect to the traditional current control in the winding.

**Key words:** axial electromagnetic bearings, solid iron core, eddy currents, magnetic flux calculator, control processes modeling, transient and frequency characteristics.

### List of References

1. Kutsevalov V. M. Matters of theory and design of asynchronous machines with solid rotors / V. M. Kutsevalov // Moscow – Leningrad : – Energiya. – 1966. – 304 p. : with figures.
2. Mathematical model of an axial magnetic bearing with consideration of eddy currents / V. P. Vereshchagin, V. A. Klabukov // Matters of Electromechanics. VNIIEM Proceedings. – Moscow – 2011 – Vol. 123. – No. 4. – Pp. 3 – 8.
3. United States Patent No. 4308490 of 29.12.1981. Device for compensating the gain of a servo-controlled circuit by negative current feedback // Habermann et al. – SEP. France 15. 02. 1979.
4. Control of electromagnetic bearings with magnetic flux feedback / V. P. Vereshchagin, V. A. Klabukov, A. V. Rogoza // Matters of Electromechanics. VNIIEM Proceedings. – Moscow – 2012 – Vol. 131. – No. 6. – Pp. 3 – 10.

*Vladimir Petrovich Vereshchagin, Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Chief Researcher, tel.: +7 (495) 365-50-73.*

*Irina Valerevna Gurova, Engineer, tel.: +7 (495) 366-31-88.*

*Aleksandr Valerevich Rogoza, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Head of SPC, tel.: +7 (495) 366-04-79.*

*Aleksandr Vasilevich Spirin, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Leading Specialist,*

*tel.: +7 (495) 366-26-10, e-mail: vniiem@vniiem.ru.*

*(JC «VNIIEM Corporation»).*