

---

---

## СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

---

УДК.621.3

А.Н. Кузменков, Г.М. Мирясов, В.Г. Титов, А.В. Шахов

### РАСЧЕТ КОНТУРОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОДШИПНИКА

Нижегородский государственный технический университет  
им. Р.Е. Алексеева

Современным направлением повышения эффективности электротехнических комплексов, в состав которых входят электродвигатели, является применение принципиально нового вида подшипников – электромагнитных (ЭМП). Широкому распространению ЭМП препятствует их высокая стоимость, напрямую связанная с трудностями технической реализации. При этом важное значение имеет система автоматического управления. Статья посвящена исследованию контуров регулирования ЭМП. Выполнен анализ принципов построения систем управления ЭМП, отмечены достоинства и недостатки одноконтурных и многоконтурных систем управления. Для трехконтурной системы управления приведены кривые переходных процессов тока при различных типах регуляторов тока, а также построены диаграммы переходных процессов по управляющему и возмущающему воздействию. Установлено, что ЭМП, оснащенные трехконтурной системой управления с релейным регулятором тока обладают высоким быстродействием, но в то же время имеют малую статическую жесткость.

**Ключевые слова:** переходные процессы, регулирование тока, система управления, электродвигатель, электромагнитный подшипник.

Важным элементом многих энергетических машин является ротор, который вращается в подшипниковых опорах. Рост скоростей вращения и необходимость снижения потерь мощных роторных машин делают актуальной задачу разработки принципиально нового вида подшипников, в которых для создания опорных реакций используются магнитные и электрические поля. Среди них наибольший практический интерес представляют электромагнитные подшипники (ЭМП). Применение ЭМП в конструкции мощных электродвигателей позволяет увеличить срок службы и расширить эксплуатационные возможности создаваемых агрегатов.

Несмотря на очевидные преимущества ЭМП, данный вид подшипников не получает широкого применения в силу определенных причин. Основной проблемой является сложность технической реализации ЭМП, с чем связана их высокая стоимость. Сложность и стоимость во многом зависят от технической реализации системы автоматического управления (САУ), без которой данный вид опор не может функционировать в принципе.

Для структурного и параметрического синтеза САУ используется математическая модель одной оси ЭМП [1]:

$$\begin{cases} U_1 = L_1 \cdot \frac{dI_1}{dt} + R_1 \cdot I_1 + k_{E1} \cdot \frac{dy}{dt}; \\ U_3 = L_3 \cdot \frac{dI_s}{dt} + R_3 \cdot I_3 + k_{E3} \cdot \frac{dy}{dt}; \\ m \cdot \frac{d^2y}{dt^2} = k_{эм} \cdot \frac{I_1}{I_1 + I_s} + k_F \cdot y - G \pm F_B, \end{cases} \quad (1)$$

где  $U_1, U_3$  – напряжение питания обмоток электромагнитов, В;  $I_1, I_3$  – ток питания обмоток электромагнитов, А;  $L_1, L_3$  – индуктивность обмоток электромагнитов, Гн;  $R_1, R_3$  – активное сопротивление обмоток электромагнитов, Ом;  $k_{E1}, k_{E3}$  – коэффициенты ЭДС, В·с/м;  $y$  – возможное перемещение ротора в поле электромагнитов, м;  $m$  – масса ротора, приходящаяся на одну ось подшипника, кг;  $k_{эм}$  – коэффициент электромагнитной силы, Н/А;  $k_F$  – коэффициент, связывающий приращение электромагнитного усилия и смещение ротора (коэффициент положительной обратной связи по перемещению), Н/м;  $G$  – вес ротора, вращающегося в поле электромагнитов, Н;  $F_B$  – равнодействующая внешних сил, действующих на ротор, Н (те же самые обозначения используются и далее, в том числе и в рисунках).

В общем случае при создании систем управления электромагнитным подвесом ротора целью является обеспечение высокого быстродействия, точности поддержания ротора машины в центральном положении, демпфирование возможных вибраций. Сложность современных систем управления ЭМП обусловлена применяемыми при их синтезе методами. Можно выделить несколько принципов построения систем управления ЭМП:

- одноконтурные системы управления, синтезированные методом решения обратных задач динамики;
- двухконтурные и трехконтурные системы управления, построенные по принципу подчиненного регулирования координат.

На рис. 1 представлена структурная схема трехконтурной системы управления [2]. Настройка системы производится путем последовательной оптимизации контуров регулирования. Однако данный подход требует выделения в объекте управления ряда координат (скорость, перемещение, ток), по которым будут замкнуты соответствующие контуры регулирования. Система управления, синтезируемая по такому принципу, характеризуется простотой технической реализации (средствами как аналоговой, так и микропроцессорной техники) и простотой ограничения регулируемых координат (скорость, перемещение, ток). В качестве датчика главной обратной связи используется бесконтактный датчик, измеряющий перемещение ротора в поле электромагнитов. Коэффициент передачи датчика  $k_{д.п.}$ , В/м, выбран таким образом, чтобы при максимально возможном смещении ротора  $y = 0,2$  мм сигнал датчика был равен 10 В. Для выделения сигнала обратной связи по скорости перемещения сигнал датчика положения ротора дифференцируется и вводится в систему с коэффициентом передачи  $k_{осс}$ , В/с<sup>-1</sup> [3].

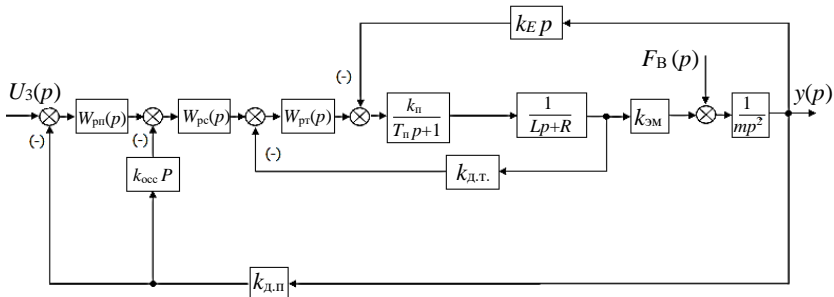


Рис. 1. Структурная схема трехконтурной системы управления электромагнитным подшипником

где  $U_3$  – напряжение задания на входе регулятора, В;  $W_{р.п.}$ ,  $W_{р.с.}$ ,  $W_{р.т.}$  – передаточные функции регуляторов положения, скорости, тока;  $k_{д.т.}$  – коэффициент передачи датчика тока;  $k_{д.п.}$  – коэффициент передачи датчика положения;  $k_{осс}$  – коэффициент передачи датчика скорости.

В разомкнутом состоянии система является неустойчивой. Введение внутреннего контура тока позволяет снизить чувствительность синтезируемой системы к внешним возмущениям, а также увеличить быстродействие системы за счёт более быстрого протекания переходных процессов. Следует отметить, что постоянная времени внутреннего контура тока достаточно велика (~50 мс), что приводит к необходимости большой форсировки по источнику питания [4]. Принимая во внимание, что регулирование тока в электромагнитном подшипнике обеспечивается широтно-

импульсным регулятором, представляет особый интерес рассмотреть объект управления как импульсный. Импульсная система управления может быть представлена в виде последовательного соединения импульсного элемента и непрерывной части (рис. 2). Импульсный элемент можно представить как последовательное соединение идеального элемента  $T$  и формирующего элемента (фиксирующей цепи) с передаточной функцией  $H(s)$  [5].

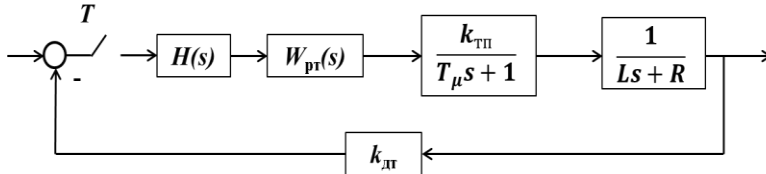


Рис. 2. Структурная схема замкнутой импульсной системы контура тока

Наиболее простым и распространенным методом расчета импульсных систем является метод z-преобразования [6]. Представлены расчетные значения изменения тока электромагнита газового нагнетателя мощностью 16 мВт, полученные при моделировании в импульсной системе построения контура тока.

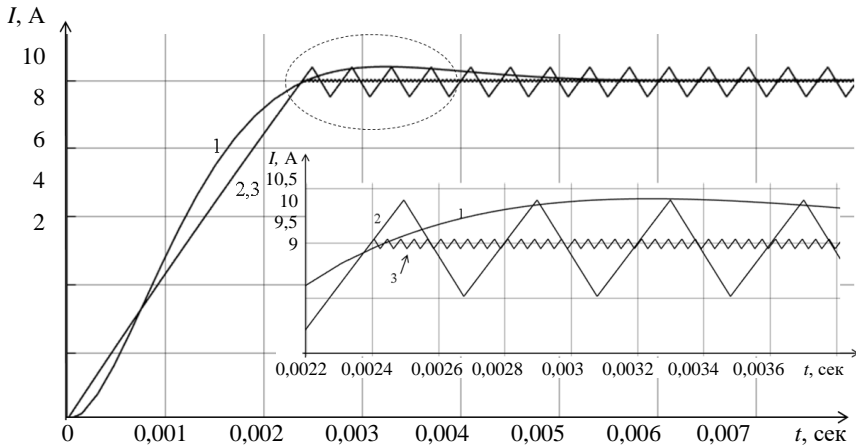


Рис. 3. Кривые переходных процессов тока при различных типах регуляторов тока:

- 1 – с ПИ регулятором; 2 – с релейным регулятором;  
3 – с релейным регулятором, работающим в скользящем режиме

С ПИ регулятором (рис. 3, кривая 1) контур тока является астатическим как по заданию, так и по возмущению. Перерегулирование при опти-

мизации на модульный оптимум составляет 4,3 %. Релейный регулятор (рис. 3, кривая 2) обеспечивает более высокое быстродействие, но процесс изменения тока имеет достаточно ярко выраженный колебательный характер. При этом характер переходного процесса определяется максимальным напряжением источника питания и шириной петли гистерезиса регулятора. Повысить качество регулирования, т.е. снизить амплитуду и поднять частоту автоколебаний, позволяет применение релейного регулятора, работающего в скользящем режиме (рис. 3, кривая 3). Скользящий режим реализуется в релейных системах, введением внутренней обратной связи, охватывающей релейный элемент. На практике всегда реализуется режим близкий к скользящему, ограничение связано с конечной частотой переключения релейного элемента. Реальный релейный элемент не может переключаться с бесконечной частотой вне зависимости от способа его реализации: аппаратной (реле), электронной (электронная схема) или программной (микропроцессорное устройство).

Практическое преимущество многоконтурных систем управления заключается в том, что настройка контуров регулирования осуществляется независимо и последовательно. Следующим этапом после настройки внутреннего контура тока, является построение трехконтурной импульсной системы управления, структура которой представлена на рис. 4.

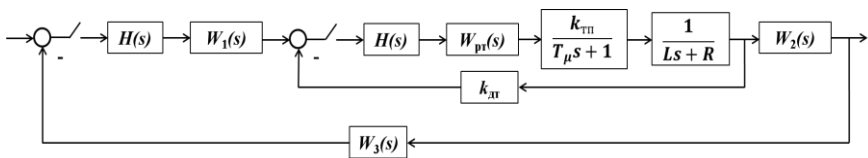


Рис. 4. Структурная схема трехконтурной системы управления с импульсным элементом

При выбранных параметрах электромагнитов, преобразователя и регуляторов переходный процесс перемещения ротора в поле электромагнитов будет иметь вид, представленный на рис. 5 [7]. В рассматриваемой системе практически отсутствует перерегулирование, выходная координата у максимально приблизилась к заданному значению  $y_{уст}$  (рис. 5), при этом время переходного процесса составляет  $t_{пт} = 0,0065$  с. Изменение режима работы системы возникает в результате прикладываемого к ней внешнего воздействия. Внешнее возмущение в виде скачкообразной нагрузки наиболее характерно для систем стабилизации. Следует отметить, что основными силами, действующими на ЭМП, являются центробежные силы от неуравновешенности ротора [8]. Анализ зависимостей отклонения ротора показал, что максимально допустимое

значение несбалансированной массы составляет 8,6 % при скорости вращения ротора  $n = 6000$  об/мин. Произведена оценка устойчивости системы, при обработке возмущающего воздействия  $F_B = 20000$  Н, соответствующего значению несбалансированной массы 1% от массы ротора (рис. 6).

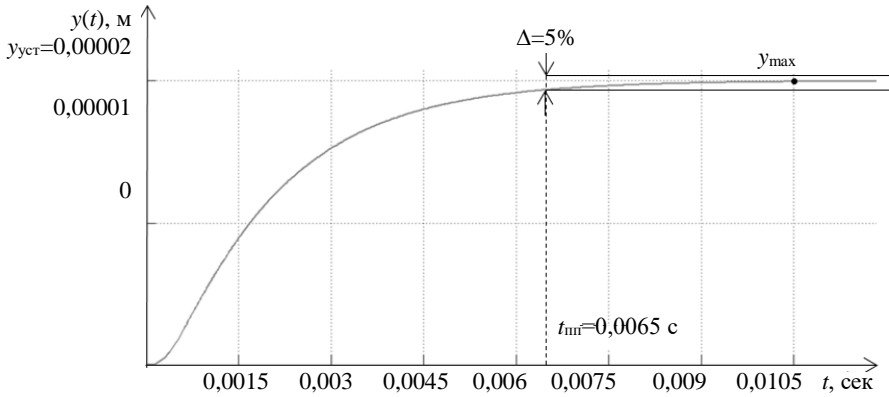


Рис. 5. Переходный процесс по управляющему воздействию при единичном задании

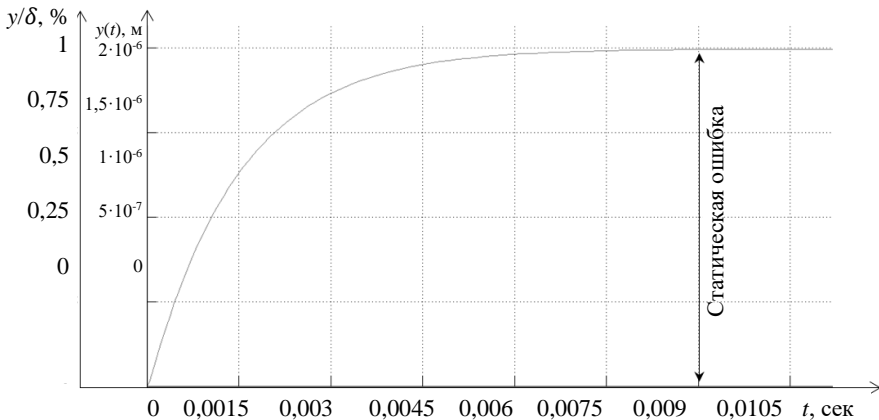


Рис. 6. Переходный процесс по возмущающему воздействию

Анализ результатов моделирования показывает, что электромагнитные подшипники, оснащенные трехконтурной системой управления с релейным регулятором тока, обладают высоким быстродействием, но в то же время имеют малую статическую жесткость (рис. 6). Время переходного процесса составило  $t_{\text{пн}} = 0,0065$  с, статическая ошибка регулирования 1%, т.е. при внешнем воздействии ротор отклоняется от центрального положения на величину, составляющую 1% допустимого зазора  $\delta$ . Это позволяет использовать подобные системы в установках, где необходимо высокое быстродействие, а не максимальная жесткость и нагрузочная способность. При смещении вала в одном из направлений в соответствующей катушке возбуждается ток, создающий магнитную силу, стремящуюся вернуть вал в центральное положение.

© Кузменков А.Н., 2018

© Мирясов Г.М., 2018

© Титов В.Г., 2018

© Шахов А.В., 2018

#### Библиографический список

- [1] Сарычев А.П., Руковицын И.Г. Математическая модель ротора для анализа управления магнитными подшипниками // Вопросы Электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2008. Т. 107. С. 11-15.
- [2] Кузменков А.Н., Титов В.Г., Шахов А.В. Разработка и моделирование трехконтурной системы управления электромагнитным подшипником // Вестник АГТУ. Сер. Управление, вычислительная техника и информатика. 2015. № 4. С. 14-23.
- [3] Макаричев Ю.А., Стариков А.В., Ткаченко И.С. Синтез системы подчиненного регулирования электромагнитным подвесом ротора // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Физико-математические науки». 2007. № 1 (14). С. 143-148.
- [4] Наумец А.Е., Таганов Р.С., Мирясов Г.М., Титов В.Г. Оптимизация контура регулирования тока электромагнитного подшипника // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. № 5 (102). С. 298-302.
- [5] Журавлев Ю.Н. Активные магнитные подшипники: теория, расчет, применение. СПб.: Политехника, 2003. – 206 с.
- [6] Макаричев Ю.А., Стариков А.В., Ткаченко И.С. Дискретная математическая модель цифровой системы управления электромагнитным подвесом ротора // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Физико-математические науки». 2007. № 2 (15). С. 186-188.
- [7] Титов В.Г., Кузменков А.Н., Шахов А.В. Разработка и моделирование трехконтурной системы управления электромагнитным подшипником // Инженерный вестник Дона, 2015. № 3 (37). С. 26.

- [8] Абдуррагимов А.С., Носков А.В., Сарычев А.П. Опыт применения магнитных подшипников в компрессорах ГПА // Труды 15 Международного симпозиума «Потребители производители компрессоров и компрессорного оборудования», СПб. 2010. – С. 128.

**A.N. Kuzmenkov, G.M. Miryasov, V.G. Titov, A.V. Shakhov**

## **CALCULATION OF ADJUSTMENT CIRCUITS OF ELECTROMAGNETIC BEARING**

Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R.E. Alekseev,  
Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract.** The modern direction of improving the efficiency of electrical systems, which include electric motors, is the use of a fundamentally new type of bearings – electromagnetic bearings (EMF). The EMF widespread is hampered by their high cost, directly related to the difficulties of technical implementation. At the same time, the automatic control system is important. The article is devoted to the study of the regulation contours of EMF. The analysis of the principles of building EMF control systems is performed. The advantages and disadvantages of single-loop and multi-loop control systems are noted. Current transient curves are given for a three-loop control system for various types of current regulators, and transient diagrams for control and perturbing effects are plotted. It is established that EMFs equipped with a three-circuit control system with a relay current regulator have high speed, but at the same time have low static rigidity.

**Keywords:** current control, control system, electric motor, electromagnetic bearing, transients.

### **References**

- [1] A.P. Sarychev and Rukovitsyn I.G., «Rotor mathematical model for magnetic bearings control analysis», Electromechanical matters. VNIEM studies, vol. 107, pp. 11-15, 2008.
- [2] A.N. Kuzmenkov, V.G. Titov and A.V. Shakhov, «Development and modeling of the three-element system of control of electromagnetic bearing», Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics, vol. 4, pp. 14-23, 2015.
- [3] Yu.A. Makarichev, A.V. Starikov and I.S. Tkachenko, «Synthesis of a system for secondary control of a rotor with an electromagnetic bearing», Journal of Samara State Technical University, Ser. Physical and Mathematical Sciences, vol. 1, no. 14, pp. 143-148, 2007.
- [4] A.E. Naumets, R.S. Taganov, G.M. Miryasov, V.G. Titov, «Optimization of current control circuit of electromagnetic bearing», Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev, vol. 5, no. 102, pp. 298-302, 2013.



- [5] Yu.N. Zhuravlev, Active magnetic bearings: theory, calculation, application. St. Petersburg: Polytechnic, 2003.
- [6] Yu.A. Makarichev, A.V. Starikov and I.S. Tkachenko, «Discrete mathematical model of digital control system for electromagnetic suspension of rotor», Journal of Samara State Technical University, Ser. Physical and Mathematical Sciences, vol. 2, no. 15, pp. 186-188, 2007.
- [7] V.G. Titov, A.N. Kuzmenkov and A.V. Shakhov, «Design and modeling of three-loop control system of an electromagnetic bearing», Engineering journal of Don, vol. 3, no. 37, p. 26, 2015.
- [8] A.S. Abduragimov, A.V. Noskov and A.P. Sarychev, «Experience of using magnetic bearings in GPU compressors», in proc. 15th International Symposium «Consumers manufacturers of compressors and compressor equipment», St. Petersburg, 2010, p. 128.