УДК.621.3

А.Н. Кузменков, В.Г. Титов, В.Ф. Стрелков

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНТУРА РЕГУЛИРОВАНИЯ ТОКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОДШИПНИКА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрены вопросы построения импульсной системы управления радиальным электромагнитным подшипником для мощных вращающих агрегатов и различные варианты построения внутреннего контура тока. В разомкнутом состоянии система является неустойчивой и обладает особенностями, которые необходимо учитывать при синтезе регуляторов.

Для расчета параметров регуляторов используется метод передаточных функций, метод *z*-преобразования и компьютерное моделирование в программном комплексе Matlab Simulink. В результате моделирования импульсной системы показано, что наиболее рациональным является построение контура тока ЭМП с релейным регулятором, работающим в скользящем режиме. Полученные результаты использованы при построении системы управления электромагнитным подшипником газового нагнетателя компрессорной станции «Помарская».

Ключевые слова: электромагнитный подшипник, контур тока, релейный регулятор, импульсная система управления, метод z-преобразования, Matlab Simulink.

Электромагнитные подшипники являются перспективными видами опор, которые находят применение в высокоскоростных машинах и агрегатах с большой массой ротора. Применение электромагнитных подшипников для подвеса ротора компрессора газоперекачивающего агрегата позволяет исключить маслосистему, необходимую для работы традиционного гидростатического подшипника скольжения. Причем следует отметить, что доля компрессоров с электромагнитным подвесом ротора с каждым годом увеличивается. В работе на примере газового нагнетателя мощностью 16мВт перекачивающей станции «Помарская» газопровода «Уренгой–Помары–Ужгород», рассматриваются вопросы построения цифровой системы управления радиальным и осевым электромагнитными подшипниками (ЭМП). Рабочие зазоры между статором и ротором нагнетателя составляют десятые доли миллиметра при весе ротора нагнетателя около одной тонны[1].

Подвес ротора в электромагнитном подшипнике обеспечивается за счёт взаимодействия между управляемыми электромагнитами статора и ферромагнитными сердечниками ротора. Стабилизация заданного положения ротора достигается за счёт регулирования токов в обмотках электромагнитов по сигналам датчиков положения ротора. Электромагниты являются исполнительными органами стабилизации ротора в центральном положении. Обычно выделяют четыре активные зоны, которые располагаются по окружности подшипника под углом 90° относительно друг друга. Причем каждая из этих зон представляет собой самостоятельный электромагнит. При горизонтальном расположении ротора машины, когда вес ротора значительно превышает действующие возмущения, оси полюсов подшипника располагают под углом 45° относительно вертикальной оси y, что позволяет распределить весовую нагрузку между электромагнитами (рис. 1) [2].

Магнитные силы $F_1 - F_4$, создаваемые электромагнитами, обеспечивают компенсацию веса ротора G и равнодействующую других внешних сил $F_В$, Н. Из рассмотренной схемы рис. 1 следует, что электромагнитный подшипник как радиальный, так и осевой представляет собой неустойчивый объект управления. Неустойчивость объекта вызвана, прежде всего, наличием положительной обратной связи по перемещению и большой постоянной времени электромагнита, которая зависит от величины зазора между статором и ротором ЭМП, а значит, меняется периодически. Поэтому без системы управления, обеспечивающей устойчи-

© Кузменков А.Н., Титов В.Г., Стрелков В.Ф., 2017.

вость, электромагнитные опоры работать в принципе не могут. Структурный синтез системы и выбор параметров регуляторов обеспечивают как устойчивость, так и требуемые статические и динамические характеристики электромагнитного подшипника. Для повышения быстродействия электромагнитных подшипников, что очень актуально для высокоскоростных машин, применяют принципы построения и методы синтеза систем подчиненного регулирования Настройка системы производится путем последовательной оптимизации контуров регулирования. Синтезируемая по такому принципу система управления характеризуется простотой технической реализации (как средствами аналоговой, так и средствами микропроцессорной техники) и простотой ограничения регулируемых координат (ток, скорость и т.д.) [4, 5]. Практическое преимущество многоконтурных систем управления заключается в том, что настройка контуров регулирования осуществляется независимо и последовательно.

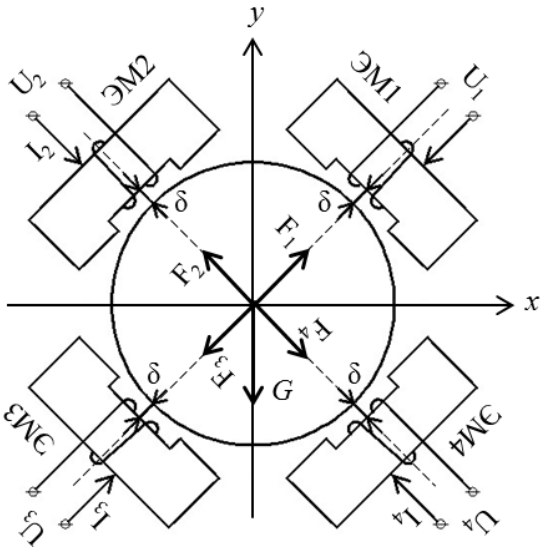

Рис. 1. Расчетная схема электромагнитного подшипника:
ЭМ1–ЭМ4 – электромагниты; U_1–U_4 – напряжения, подаваемые на катушки электромагнитов, В;
I1–I4 – токи, наводимые в обмотках электромагнитов, А; F_1–F_4 – магнитные силы, создаваемые электромагнитами, Н; G – вес ротора нагнетателя, Н;
δ – регламентируемый зазор между ЭМП и цапфой вала нагнетателя, м

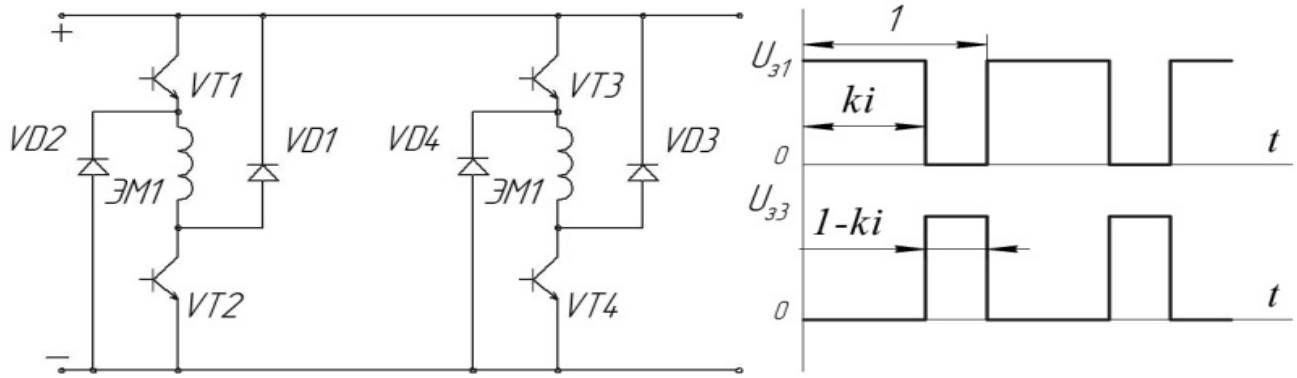

Рис. 2. Схема питания и диаграмма задающих импульсов при дифференциальном управлении токами обмоток электромагнитного подшипника

Также из схемы рис. 1 следует, что для системы управления ЭМП наиболее предпочтительной является дифференциальная схема питания за счет линейности тяговой характеристики и её максимальной жесткости при центральном положении ротора. Здесь посредством широтно-импульсной модуляции (ШИМ) оба электромагнита из пары ЭМ1–ЭМ3 и

ЭМ2–ЭМ4 управляются одним ШИМ-модулятором, первый магнит от прямого выхода, а противоположный – от инверсного. При таком управлении сумма токов в противоположных катушках, расположенных на одной оси, остается постоянной, т.е. увеличение одного тока приводит к пропорциональному снижению тока в противоположной катушке [3]. Иллюстрация этого способа управления, основанная на широтно-импульсной модуляции тока, показана на рис. 2. Кроме того, в этой схеме вдвое сокращается число силовых вентилей по сравнению с независимым управлением токами всех четырех обмоток. Здесь в качестве коммутирующих элементов применены IGBT транзисторы (VT1-VT4), работающие в режиме широтно-импульсной модуляции с несущей частотой 1-2 кГц.

При рассмотренном расположении электромагнитов (рис. 1) и дифференциальном управлении токами электромагнитов можно рассматривать каждую ось подшипника как магнитный подвес двустороннего действия, преобразующий электрическую энергию сети питания в работу магнитных сил, обеспечивающих заданное положение ротора [1]. Контур регулирования тока представлен на рис. 3. В соответствии со структурной схемой внутренний контур образуется регулятором тока, силовым преобразователем, объектом регулирования и обратной связью по току через датчик тока.

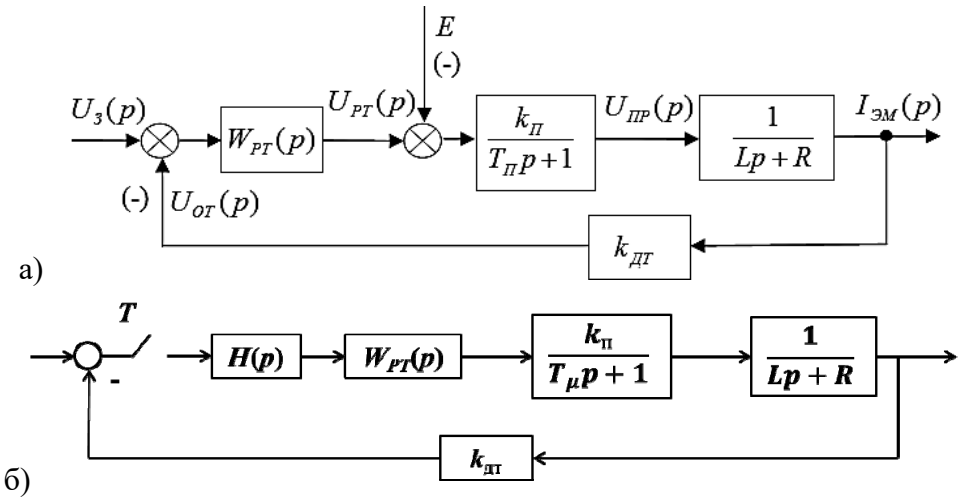

Рис. 3. Структурная схема внутреннего контура тока ЭМП:
а – структурная схема внутреннего контура тока;
б – импульсная модель внутреннего контура тока

При расчете регулятора тока контур тока настраивается на модульный оптимум, при этом пренебрегают влиянием ЭДС движения *E*, В, и положительной обратной связью по перемещению [3]. Таким образом, в качестве регулятора тока в системе подчиненного регулирования электромагнитного подвеса ротора должен быть использован пропорционально-интегральный регулятор. Настройки регулятора будут определяться следующими параметрами:

$$W_{РТ}(p) = \frac{Lp + r}{2k_П k_{ДТ} T_\mu p}, \quad (1)$$

где T_μ – малая постоянная времени во внутреннем контуре тока, с; $k_П$ – коэффициент передачи силового преобразователя; $k_{ДТ}$ – коэффициент передачи датчика тока; L – индуктивность электромагнита, Гн; r – активное сопротивление электромагнита, Ом;

Современные системы управления электромагнитными подшипниками являются цифровыми, центральным вычислительным ядром которых служит мощный программируемый контроллер. Принимая во внимание, что регулирование тока в электромагнитном подшипнике обеспечивается широтно-импульсным регулятором, представляет особый интерес

рассмотреть объект управления как импульсный. Импульсная система управления (рис. 3, *б*) может быть представлена в виде последовательного соединения импульсного элемента и непрерывной части. Импульсный элемент можно представить как последовательное соединение идеального элемента *T* и формирующего элемента (фиксирующей цепи) с передаточной функцией *H(p)* [4].

Для получения дискретных моделей, как правило, используют математический аппарат z-преобразований. Импульсная передаточная функция замкнутого контура тока

$$W_{ЗКТ}(z) = \frac{z\dfrac{k_{РТ}k_{П}(T_{\mu}p+1)}{p(T_{\mu}p+1)(Lp+r)}}{1+z\dfrac{k_{РТ}k_{П}(T_{\mu}p+1)}{p(T_{\mu}p+1)(Lp+r)}}. \qquad (2)$$

Формула (2) получена для самой простой непрерывной модели (рис. 3, *б*), когда предполагается, что регулятор системы управления может регулировать непосредственно токи электромагнитов. Дискретные передаточные функции позволяют исследовать устойчивость цифровой системы управления электромагнитным подшипником, корректно определить период дискретизации и на этапе проектировании определить достижимые жесткостные свойства магнитной опоры. Существует также способ параметрического синтеза регуляторов цифровой системы управления электромагнитным подшипником с использованием моделирования в программной среде Matlab Simulink. При этом в расчетной модели объект представляют непрерывным и подключают к нему цифровой регулятор и экстраполятор. Параметры дискретной передаточной функции регулятора определяют методом подбора.

На рис. 4 представлены расчетные значения изменения тока электромагнита газового нагнетателя мощностью 16 мВт, полученные при моделировании обозначенных вариантов построения контура тока. Представляет интерес рассмотреть несколько вариантов построения внутреннего контура тока [5]:

- контур тока с пропорционально-интегральным (ПИ) регулятором (рис. 4, *1*, *2*);
- контур тока с релейным регулятором (рис. 4, *3*);
- контур тока с релейным регулятором, работающим в скользящем режиме (рис. 4, *4*).

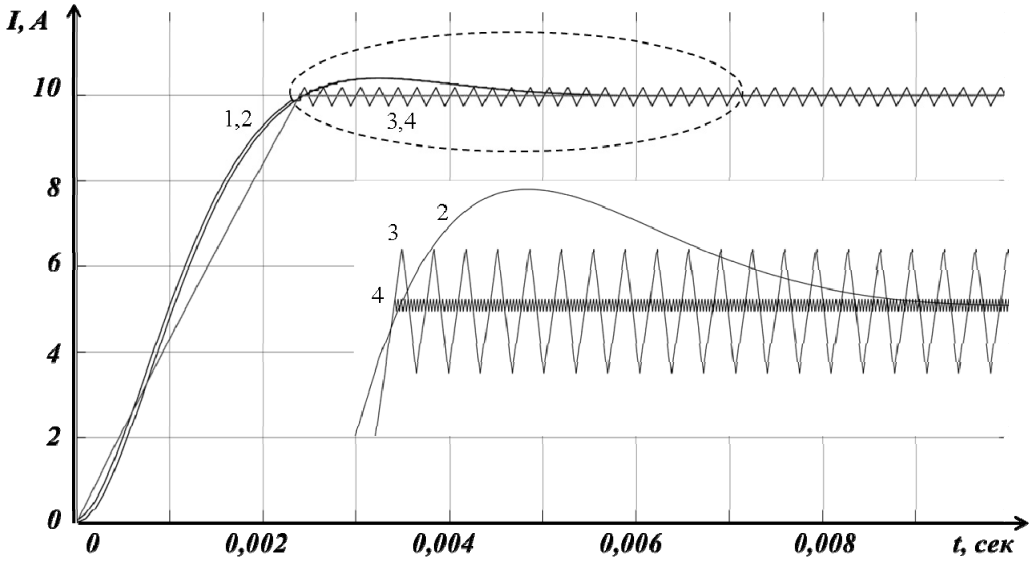

Рис. 4. Кривые переходных процессов тока при различных типах регуляторов тока:
1, *2* – контур тока с пропорционально-интегральным регулятором;
3 – контур тока с релейным регулятором;
4 – контур тока с релейным регулятором, работающим в скользящем режиме

Для оценки адекватности полученных дискретных передаточных функций построены по ним переходные процессы и проведено их сравнение с аналогичными процессами, рассчитанными для непрерывного объекта (рис. 4). Результаты моделирования дают возможность сделать вывод, что полученные дискретные передаточные функции позволяют с достаточной степенью точности описывать процесс перемещения ротора при цифровой технической реализации системы управления осевым электромагнитным подшипником. Анализ кривых *1* и *2* (рис. 4) показывает, что переходные процессы практически совпадают, а максимальная погрешность на интервале времени, равном 100 тактам периода дискретизации, составляет около 1%.

С ПИ регулятором (рис. 4, *2*) контур тока является астатическим как по заданию, так и возмущению. Перерегулирование при оптимизации на модульный оптимум составляет 4,3%. Релейный регулятор (рис. 4, *3*) обеспечивает более высокое быстродействие, но процесс изменения тока имеет достаточно ярко выраженный колебательный характер. При этом характер переходного процесса определяется максимальным напряжением источника питания, шириной петли гистерезиса регулятора и постоянной времени $T_П$. Чтобы повысить качество регулирования, т.е. снизить амплитуду и поднять частоту автоколебаний, необходимо ввести корректирующую цепь. Используя данный способ, можно получить в системе как медленно затухающие апериодические процессы (скользящие), так и оптимальные переходные процессы.

Скользящий режим реализуется в релейных системах введением внутренней обратной связи с коэффициентом усиления k, охватывающей релейный элемент. Проведен анализ влияния коэффициента k в обратной связи релейного регулятора на характер переходных процессов в контуре тока (рис. 5). Действие внутренней связи приводит к тому, что как только управляющий сигнал проходит через пороговое значение, релейный элемент через внутреннюю обратную связь изменяет его так, что этот сигнал проходит через пороговое значение в обратном направлении. Релейные регуляторы, работающие в скользящем режиме, принято называть вибрационными регуляторами.

Анализ результатов моделирования показывает, что практически оптимальным является выбор коэффициента в обратной связи k=0,0000001 (рис. 5, *3*). При такой настройке регулятора процесс нарастания тока имеет практически апериодический характер (рис. 4, *4*).

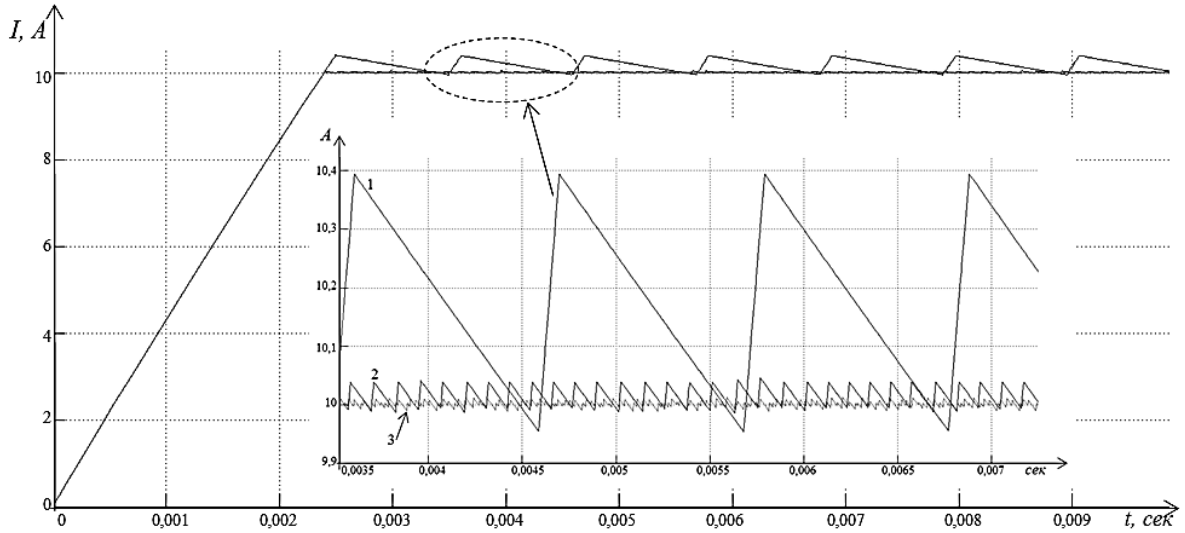

Рис. 5. Кривые переходных процессов тока при различных коэффициентах гибкой обратной связи релейного регулятора:
1 – k=0,00001; *2* – k=0,000001; *3* – k=0,0000001

На практике всегда реализуется режим, близкий к скользящему, вводится ограничение конечной частоты 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). Из полученных результатов видно, что наилучшими показателями по быстродействию изменения тока электромагнитного подвеса обладает релейный регулятор тока. При этом релейный регулятор тока выполняется с гибкой обратной связью по току, что делает процесс нарастания тока практически апериодическим.

Библиографический список

1. **Наумец, А.Е.** Оптимизация контура регулирования тока электромагнитного подшипника А.Е. Наумец [и др.] // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. – 2013. – №5(102). – С. 298–303.
2. **Журавлев, Ю.Н.** Активные магнитные подшипники: теория, расчет, применение / Ю.Н. Журавлев. – СПб.: Политехника, 2003. – 206 с.
3. **Сарычев, А. П.** Математическая модель ротора для анализа управления магнитными подшипниками / А. П. Сарычев, И. Г. Руковицын // Тр. НПП ВНИИЭМ. – 2008. – Т. 107. – С. 11–15.
4. **Кузменков, А.Н.** Разработка и моделирование трехконтурной системы управления электромагнитным подшипником / А.Н. Кузменков, В.Г. Титов, А.В. Шахов // Вестник АГТУ. Сер. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2015. – №4. – С. 27–36.
5. **Титов, В.Г.** Разработка и моделирование трехконтурной системы управления электромагнитным подшипником / В.Г. Титов, А.Н. Кузменков, А.В. Шахов // Инженерный вестник Дона. – 2015. – №3. – С. 17–23.

Дата поступления
в редакцию30.06.2017

A.N. Kuzmenkov, V.G. Titov, V.F. Strelkov

OPTIMIZATION OF CURRENT CONTROL CIRCUIT OF ELECTROMAGNETIC BEARING

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

Purpose: Issues of creating a pulse system of radial electromagnetic bearing for powerful rotating machines and different variants of constructing the inner current circuit are considered.
Research limitations: In the open state the system is unstable and has the features, which must be considered while synthesizing the regulator.
Methodology: To calculate the parameters of regulators used the method of transfer functions, z-transformation method and the computer simulation method in Matlab Simulink software.
Findings: In the result of simulating a pulsed control system is shown that the best performance in speed and overshoot has a relay regulator operating in sliding mode. The acquired results are utilized while building up a system of controlling the electro-magnetic bearing of a gas pressurizer in “Pomarskaya” compressor station.

Key words: electromagnetic bearing, pulse control system, current loop, relay controller, z-transformation method, Matlab Simulink.