

Тем самым класс функций Ляпунова, пригодных для изучения асимптотического поведения решений неавтономных вполне интегрируемых уравнений, существенно расширен за счет значительного ослабления традиционного для второго метода Ляпунова [1, 2] условия знакоотрицательности либо отрицательной определенности производной функции Ляпунова во всех внутренних точках конуса по всем направлениям из конуса.

Библиографические ссылки

1. *Гайшун И.В.* Вполне разрешимые многомерные дифференциальные уравнения. М., 2004.
2. *Гайшун И.В., Княжище Л.Б.* Условия устойчивости решений автономных вполне интегрируемых уравнений // Дифференциальные уравнения. 1982. Т. 18. № 8. С. 1453–1456.

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕГУЛЯТОРОВ ТОКА: ТРЕХСТАБИЛЬНЫЙ ГИСТЕРЕЗИСНЫЙ И ШИМ-КОНТРОЛЛЕР

**Н.Г. Кодочигов, И.В. Друмов, Н.Ф. Ковалевский,
С.А. Малкин**

Опытное конструкторское бюро машиностроения имени И.И. Африкантова
Нижний Новгород, Россия
{kodochigov, drumov}@okbm.nnov.ru, ser-malkin@yandex.ru

Как известно, в контроллерах активного магнитного подвеса команды по току или напряжению создаются посредством измерения перемещения подвешенного объекта относительно центра страховочных подшипников. Силовые цепи электроники прикладывают напряжение к клеммам обмоток для создания в них тока. Скорость вращения ротора в электромагнитном подвесе может достигать десятков тысяч оборотов в минуту, поэтому скорость изменения тока должна быть также большой, для того чтобы отслеживать команды управления. В тоже время, значения амплитуд и частот напряжения ограничены максимально допустимыми значениями, а также индуктивностью обмоток электромагнитного подшипника (ЭМП). Если отклик по току недостаточно быстрый, то контур обратной связи становится нестабильным, в результате чего вал падает [1].

Первоначально при разработке регулятора тока для стендов на электромагнитном подвесе был реализован релейный регулятор тока с

зоной гистерезиса – линейный усилитель. Данные линейные усилители имеют преимущество по точности регулировки тока и напряжения, а также имеют низкий шум. К недостаткам можно отнести необходимость эффективного охлаждения транзисторов выходного каскада. Так, при проведении исследовательских работ, связанных с вывешиванием модели ротора в электромагнитном подвесе была выявлена эпизодическая неустойчивость, возникающая в районе одного ЭМП и вызывающая значительные колебания ротора. Предполагается, что одной из причин возникновения неустойчивости может быть недостаточное качество тока, подаваемого в обмотки ЭМП и замедление спада тока. Данное предположение нашло подтверждение расчетным путем. Показано, что динамика движения ротора в ЭМП с регулятором тока на основе ШИМ-контроллера проходит значительно лучше гистерезисного регулятора с замедлением скорости спада тока.

Экспериментальные исследования канала регулирования тока производились при питании силовой части от внешнего источника напряжения величиной 30 В и 120 В с ограничением тока величиной до 3 А. В качестве сигнала задания тока использовался импульсный сигнал прямоугольной формы частотой 0,5 Гц. В процессе проверок был выполнен экспериментальный подбор оптимальных параметров ПИ-регулятора тока в составе ШИМ-контроллера.

Подбор производился путем замены резистора обратной связи $R_{\text{рег}}$, задающего пропорциональный коэффициент регулирования, и конденсатора $C_{\text{рег}}$, задающего интегральный коэффициент регулирования. Переходный процесс при нарастании и спаде тока происходит с перерегулированием до 3%. Подбор коэффициентов регулирования для данных величин тока и напряжения питания позволяет уменьшить перерегулирование практически до нуля и исключить колебательный процесс. Нарастание тока происходит по кривой, соответствующей кривой нарастания тока в электромагните (без регулирования). Спад тока происходит по кривой, соответствующей кривой спада тока в электромагните на противо-э.д.с. источника питания (без регулирования). Таким образом, замедление скорости спада тока, в отличие от гистерезисного регулятора, в регуляторе тока с ШИМ-контроллером отсутствует.

Расчетно-экспериментальными исследованиями показано, что канал регулирования тока, построенный на ШИМ-контроллере, потенциально обеспечивает лучшее качество тока питания ЭМП в сравнении с трехстабильным гистерезисным регулятором. Нарастание тока

в обмотке ЭМП в канале регулирования с ШИМ соответствует гистерезисному регулятору тока. Спад тока в канале регулирования с ШИМ обеспечивается быстрее, чем в канале с трехстабильным гистерезисным регулятором. К недостаткам канала с ШИМ-контроллером следует отнести возможность перерегулирования при неоптимальной настройке ПИД-регулятора, что может сказаться на устойчивости регулирования положения ротора.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16-19-10279).

Библиографические ссылки

1. Schweitzer G., Maslen E. Magnetic bearings. Springer, 2009.

ОБ ОДНОЙ ЗАДАЧЕ ОПТИМАЛЬНОГО ГАРАНТИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ЛИНЕЙНОЙ ДИСКРЕТНОЙ СИСТЕМОЙ

Д.А. Костюкевич, Н.М. Дмитрук

Белорусский государственный университет
Независимости 4, 220030 Минск, Беларусь
{kostyukDA,dmitrukn}@bsu.by

Рассматривается задача оптимального управления линейной дискретной системой с возмущениями

$$\min_u \max_w \{ \|Px(N)\|_\infty + \sum_{k=1}^{N-1} \|Qx(k)\|_\infty + \sum_{k=0}^{N-1} \|Ru(k)\|_\infty \},$$

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + Mw(k), \quad x(0) = x_0, \quad u(k) \in U, \quad (1)$$

$$g_{\min} \leq Hx(k) \leq g_{\max}, \quad \forall w(k) \in W, \quad k = \overline{1, N},$$

где $x(k) \in \mathbb{R}^n$ — состояние системы в момент k , $u(k) \in U \subset \mathbb{R}^r$ — управление, $w(k) \in W \subset \mathbb{R}^p$ — неизвестное ограниченное возмущение, $U = \{u : \|u\|_\infty \leq u_{\max}\}$, $W = \{w : \|w\|_\infty \leq w_{\max}\}$, $Q \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $R \in \mathbb{R}^{r \times r}$ — невырожденные матрицы, $P \in \mathbb{R}^{q \times n}$; $H \in \mathbb{R}^{m \times n}$; $\|z\|_\infty = \max_i |z_i|$.

Задача (1) представляет интерес в связи с методами управления по прогнозирующей модели (Model Predictive Control — MPC), получившими широкое распространение на практике при решении задач стабилизации и регулирования. Задачи с критерием качества как в (1)