

Комбинированное управление в системах позиционирования с наблюдателем нагрузки

С.К. Лебедев, А.Р. Колганов, Н.Е. Гнездов
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Лебедева»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: lebedev@drive.ispu.ru, klg@drive.ispu.ru, gnezdov@drive.ispu.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Применение комбинированных систем управления актуально в электромехатронных системах, подверженных действию сложных механических нагрузок. При этом использование наблюдателей состояния в таких системах на данный момент мало изучено.

Материалы и методы: Построение наблюдателей механической нагрузки основано на методах синтеза астатических наблюдателей, в том числе и повышенного порядка. Анализ разработанных систем выполнен с применением методов классической теории автоматического управления и путем компьютерного моделирования в *Simulink*.

Результаты: Описана методика синтеза астатической комбинированной системы управления с наблюдателем нагрузки. Предложена настройка регулятора положения, а также наблюдателя нагрузки на стандартное распределение корней по Бесселю. Выполнен анализ динамических характеристик астатической системы и астатической комбинированной системы с наблюдателем нагрузки при действии механических нагрузок различной формы на модуль с жесткой механикой.

Выводы: Полученные результаты подтверждают эффективность применения комбинированных систем с наблюдателями для обеспечения высокого качества регулирования в условиях действия механических нагрузок различной природы.

Ключевые слова: системы управления, электропривод, наблюдатель состояния, комбинированные системы.

Complex Control in Positioning Systems with Load Observer

S.K. Lebedev, A.R. Kolganov, N.E. Gnezdov
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: lebedev@drive.ispu.ru, klg@drive.ispu.ru, gnezdov@drive.ispu.ru

Abstract

Background: The article is devoted to the complex control systems, which is popular in electric and mechatronic systems under the influence of complex mechanical loads. At the same time, the observers implementation in such systems is investigated insufficiently.

Materials and methods: Construction of observers of mechanical loads is based on the synthesis methods of astatic observers, including the increased order. The analysis of the developed systems is carried out with the usage of the methods of the classical theory of automatic control, as well as computer modeling in *Simulink*.

Results: The synthesis technique of the astatic complex control systems with the load observers is described. Adjustment of a position regulator and load observer on standard roots distribution on Bessel is offered. The analysis of dynamic characteristics of astatic system and the astatic combined system with the load observer is carried out with mechanical loads of the various form on the module with rigid mechanics.

Conclusions: The received results confirm efficiency of the complex control systems application with observers for high quality maintenance of regulation in conditions of mechanical loads of the various natures.

Key words: control systems, electric drive, state observer, complex systems.

Электромехатронные модули с двигателями переменного тока, преобразователями частоты и микропроцессорным управлением позволяют сформировать статику и динамику процессов управления, повысить полосу пропускания, обеспечивая тем самым технологическое оборудование конкурентоспособными характеристиками [1, 2].

Особенно актуально применение электромехатронных модулей в системах позиционирования для станкостроения и робототехники. При этом характерным фактором влияния на характеристики каждой оси являются кинематические и динамические связи между осями в виде

переменных нагрузок сложной формы, что можно представить в виде обобщенной электромехатронной системы (рис. 1).

Модуль – основной элемент структуры, представляет собой обобщение механической части привода линейного или углового перемещения (q) с жесткой механикой, характеризующейся инерционным коэффициентом ($K_{ин}$) и возмущением – механической нагрузкой (Q_n).

Механика приводится в движение воздействием электромагнитного момента привода (Q), формируемого системой векторного управления по заданию (Q_r). Эквивалентом контура регулиро-

вания момента является инерционное звено с параметрами k_M, T_M .

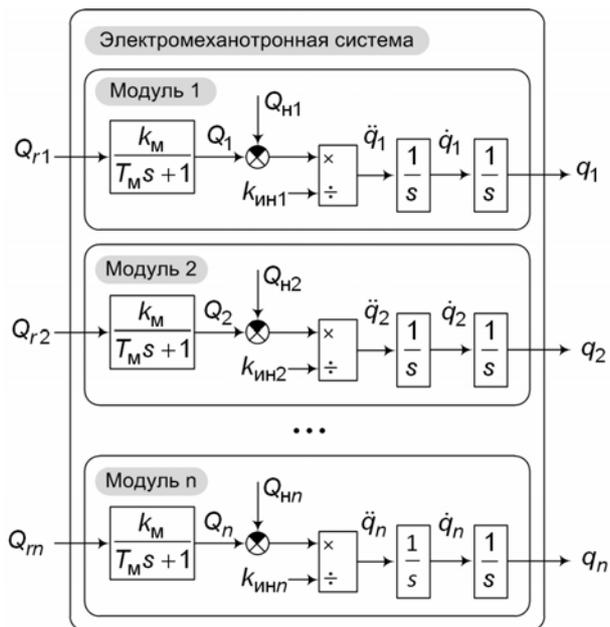


Рис. 1. Обобщенная структурная схема электромеханотронной системы

В основе теории управления два основополагающих принципа: регулирование по отклонению и регулирование по возмущению. Традиционно системы управления электроприводом базировались на основе использования принципа регулирования по отклонению при построении контуров регулирования момента, скорости и положения, а влияние нагрузки на характеристики определялось жесткостью механических характеристик при использовании статических регуляторов.

Астатические регуляторы в рамках регулирования по отклонению обеспечивают контроль только статической ошибки. Альтернатива – принцип регулирования по возмущению, широко не применялся из-за сложности технической реализации контура компенсации и сложности определения возмущений.

Реализация компенсирующей связи по возмущению на основе использования наблюдателей нагрузки [2] позволяет перейти к практическому использованию комбинированного управления, что обеспечивает контроль динамических процессов по возмущению.

Предлагается структура электромеханотронной системы с комбинированным управлением (рис. 2), в которой максимальным образом задействованы оба принципа управления.

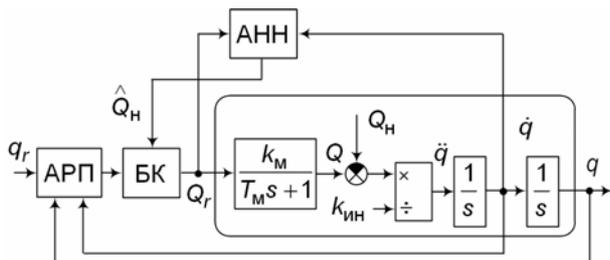


Рис. 2. Комбинированная система с компенсацией нагрузки

Применяем астатический регулятор положения (АРП) для обеспечения качества регулирования по управлению и отсутствия статической ошибки по возмущению. Вместе с этим применяем астатический наблюдатель нагрузки (АНН) для компенсации возмущений произвольной формы в блоке компенсации (БК).

Задание момента (Q_r) формируется регулятором и блоком компенсации по заданию на позиционирование (q_r), обратным связям по положению (q), скорости (\dot{q}) и оценке нагрузки (\hat{Q}_H) наблюдателем.

Рассмотрим методику синтеза астатической комбинированной системы с компенсацией механической нагрузки. Разработку комбинированной системы производим в два этапа:

- 1) синтез астатической системы с регулятором положения;
- 2) синтез наблюдателя и элементов контура компенсации нагрузки.

Пренебрегаем при синтезе элементов системы инерционностью контура момента привода в силу его малости в современных системах векторного управления.

В качестве регулятора для астатической системы выбираем модифицированный ПИД-регулятор с входным фильтром (рис. 3).

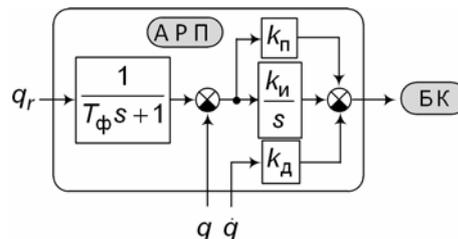


Рис. 3. Астатический регулятор положения

Характеристический полином замкнутой по положению и скорости астатической системы имеет вид

$$k_{ин}s^3 + k_d s^2 + k_p s + k_i. \quad (1)$$

Для настроек динамики системы принимаем распределение корней по Бесселю, что обеспечивает существенное повышение быстродействия и снижение переупругования [3], [4] по сравнению с распределением Баттерворта (рис. 4).

Анализ полученных графиков (рис. 4) показывает:

$\sigma = 8,15 \%$; $t_{p(1\%)} = 0,03$ с (Баттерворт);
 $\sigma = 0,65 \%$; $t_{p(1\%)} = 0,0125$ с (Бессель),
 где σ – перерегулирование; $t_{p(1\%)}$ – время достижения зоны $\pm 1 \%$.

Полином Бесселя третьего порядка имеет вид

$$s^3 + 3,41\omega_0 s^2 + 4,87\omega_0^2 s + 2,77\omega_0^3, \quad (2)$$

где ω_0 – среднегеометрический корень полинома, определяемый требуемой полосой пропускания электромеханотронного модуля.

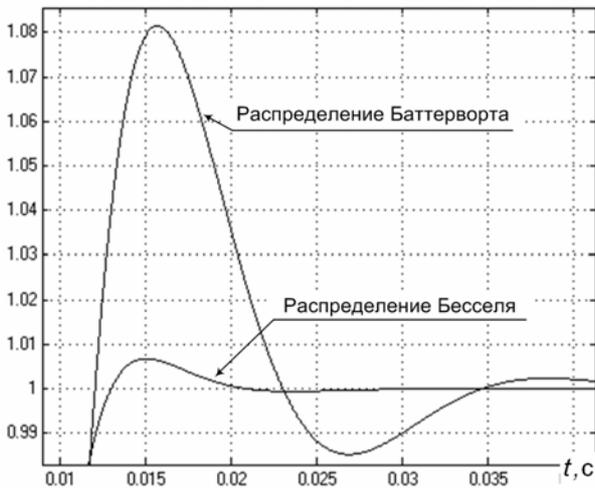


Рис. 4. Динамика системы третьего порядка

Из сопоставления полиномов (1) и (2) получаем параметры регулятора:

$$\begin{cases} k_p = 4,77k_{ин}\omega_0^2, \\ k_i = 2,77k_{ин}\omega_0^3, \\ k_d = 3,41k_{ин}\omega_0. \end{cases} \quad (3)$$

Входной фильтр в случае применения модифицированного ПИД-регулятора имеет минимальный порядок и обеспечивает компенсацию влияния на динамику нулей передаточной функции замкнутой астатической системы. Постоянная времени фильтра регулятора рассчитывается как

$$T_\phi = \frac{4,87}{2,77\omega_0}. \quad (4)$$

Наблюдатель нагрузки синтезируем как астатический наблюдатель состояния и нагрузки с астатизмом первого порядка [5–7].

Для упрощения структуры наблюдателя нагрузки полагаем выходом объекта скорость \dot{q} . Тогда уравнение состояния наблюдателя имеет вид

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{q} \\ \hat{Q}_H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{q} \\ \hat{Q}_H \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} Q_r + \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \end{bmatrix} (\dot{q} - \hat{q}), \quad (5)$$

где \hat{q}, \hat{Q}_H – оценки скорости и нагрузки; l_1, l_2 – параметры наблюдателя.

По уравнению состояния разработана структура астатического наблюдателя нагрузки (рис. 5).

Параметры наблюдателя получим, используя характеристический полином наблюдателя:

$$s^2 + l_1s - \frac{l_2}{k_{ин}}. \quad (6)$$

Сравнительный анализ графиков, полученных для системы второго порядка с распределением Бесселя и распределением Баттерворта (рис. 6), показывает:

$\sigma = 4,4 \%$; $t_{p(1\%)} = 0,021$ с (Баттерворт);
 $\sigma = 0,4 \%$; $t_{p(1\%)} = 0,012$ с (Бессель).

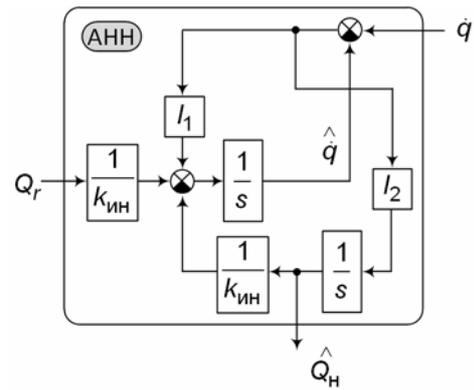


Рис. 5. Структурная схема наблюдателя нагрузки

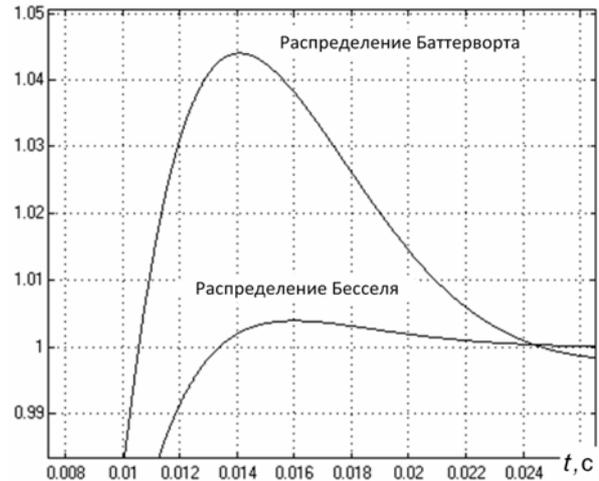


Рис. 6. Динамика системы второго порядка

Полином Бесселя для систем второго порядка имеет вид

$$s^2 + 2,2\omega_{0H}s + 1,6\omega_{0H}^2, \quad (7)$$

где ω_{0H} – среднегеометрический корень полинома наблюдателя.

Принимаем $\omega_{0H} = 5\omega_0$, учитывая соотношение быстродействия системы и наблюдателя. Тогда, сопоставив (6) и (7), получим

$$\begin{cases} l_1 = 2,2\omega_{0H}, \\ l_2 = -1,6k_{ин}\omega_{0H}^2. \end{cases} \quad (8)$$

Обобщенная структура блока компенсации (БК) показана на рис. 7. В состав блока входит сумматор, аддитивно вводящий сигнал оценки момента в прямой канал управления, и блоки компенсаций динамики привода (КДП) и динамики наблюдателя (КДН).

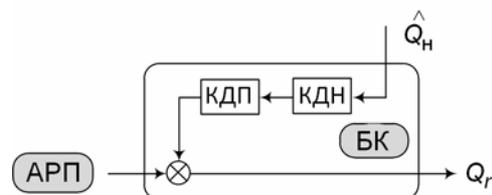


Рис. 7. Структурная схема блока компенсации

Компенсацию динамики привода в БК необходимо производить в случае невысокого быстродействия контура регулирования электромагнитного момента двигателя. В этом слу-

чае в блоке КДП реализуют динамические звенья с передаточной функцией, обратной инерционному звену контура. У современных систем приводов $T_m < 0,001$ с, поэтому на фоне полосы пропускания контура положения в диапазоне 2–10 Гц инерционностью контура момента можно пренебречь. В связи с тем, что при синтезе наблюдателя формировался только характеристический полином, возможно искажение заданной допустимой динамики наблюдателя за счет появления между нагрузкой и ее оценкой передаточной функции, имеющей нули. Для проверки этого определим передаточную функцию

$$W_H(s) = \frac{\hat{Q}_H(s)}{Q_H(s)}$$

Чтобы получить передаточную функцию, сформируем новое уравнение состояния из объекта управления разомкнутой системы и наблюдателя нагрузки:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{q} \\ \hat{\dot{q}} \\ \hat{Q}_H \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} \hat{q} \\ \hat{\dot{q}} \\ \hat{Q}_H \end{bmatrix} + \mathbf{B} \begin{bmatrix} Q \\ Q_H \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где \mathbf{A}, \mathbf{B} – матрицы параметров:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ l_1 & -l_1 & -1 \\ l_2 & -l_2 & 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ k_{ин} & k_{ин} \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Определим искомую передаточную функцию, сформировав модель «вход–выход»:

$$\begin{bmatrix} \hat{q}(s) \\ \hat{\dot{q}}(s) \\ \hat{Q}_H(s) \end{bmatrix} = (s\mathbf{E} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B} \begin{bmatrix} Q(s) \\ Q_H(s) \end{bmatrix}$$

Тогда

$$W_H(s) = \frac{-l_2}{k_{ин}s^2 + k_{ин}l_1s - l_2} \quad (10)$$

Анализ выражения (10) показывает, что в установившемся режиме имеем единичный коэффициент усиления по данному каналу, а динамика целиком определяется полиномом Бесселя (7). Таким образом, необходимость в компенсации динамики наблюдателя в данном конкретном случае отпадает.

Проверим предложенную структуру астатической системы комбинированного управления, а также методики расчета элементов средствами компьютерного моделирования.

Исследование проводим с учетом в составе электромехатронного модуля эквивалента контура момента электропривода с параметрами $T_m = 0,001$ с, $k_m = 1$. Это необходимо для оценки корректности принятого пренебрежения инерционностью этого контура при синтезе астатической и комбинированной систем.

Сравнительный анализ астатических систем с контуром компенсации нагрузки и без него, выполненный в *Simulink Matlab* (рис. 8), показывает, что контур компенсации нагрузки не влияет на процессы позиционирования (по управлению), но существенно снижает динамическую ошибку при скачке нагрузки (по возмущению).

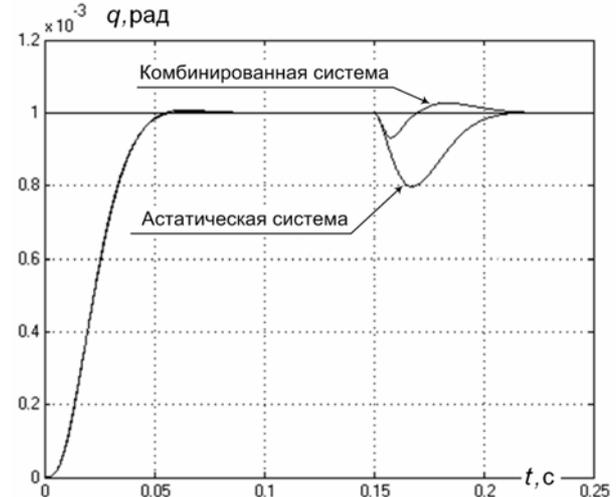


Рис. 8. Переходные процессы в астатической и комбинированной системах

В связи с тем, что в реальных электромехатронных системах форма изменения механической нагрузки может быть произвольной, проведем сравнительный анализ реакции систем при нулевом задании на позиционирование с разными формами механической нагрузки:

- постоянная механическая нагрузка;
- линейное нарастание нагрузки;
- изменение нагрузки по параболе;
- гармоническое изменение нагрузки с постоянной амплитудой и частотой.

Сравнительный анализ поведения астатической и комбинированной систем при действии механических нагрузок различной формы выполним в среде *Simulink Matlab*.

Для астатической системы с ПИД-регулятором получим аналитические выражения для установившихся значений ошибки регулирования:

$$\Delta q = q_r - q$$

Определим реакцию системы на возмущение. Для этого получим передаточную функцию замкнутой системы по возмущению:

$$W_B(s) = \frac{\Delta q(s)}{Q_H(s)} = \frac{s}{k_{ин}s^3 + k_дs^2 + k_пs + k_и} \quad (11)$$

Вычислим установившееся значение ошибки регулирования при постоянной величине нагрузки:

$$Q_H = const, \quad Q_H(s) = \frac{Q_H}{s}$$

В результате получаем

$$\Delta q_{уст} = \lim_{s \rightarrow 0} sW_B(s)Q_H(s) = 0 \quad (12)$$

Из (12) следует, что ошибка регулирования отсутствует при постоянной нагрузке, т. е. система обладает астатизмом первого порядка.

Результаты моделирования (рис. 6) показывают отсутствие статической ошибки в обеих системах.

Определим установившееся значение ошибки регулирования при линейно нарастающей величине нагрузки:

$$Q_n = kt; \quad Q_n(s) = \frac{k}{s^2}; \quad \Delta q_{уст} = \frac{k}{k_{ин}}. \quad (13)$$

Из (13) следует, что появляется ошибка регулирования конечной величины.

В результате моделирования получены графики переходных процессов при линейном нарастании нагрузки для астатической и комбинированной систем управления (рис. 9).

В этом случае астатическая система дает конечное значение ошибки, что подтверждает (13), а комбинированная система не имеет установившейся ошибки.

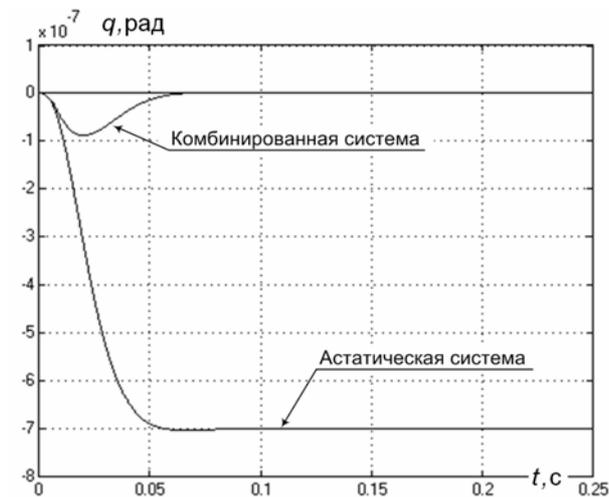


Рис. 9. Линейно нарастающая нагрузка

Определим теперь установившееся значение ошибки регулирования при параболически нарастающей величине нагрузки:

$$Q_n = kt^2, \quad Q_n(s) = \frac{2k}{s^3}.$$

В итоге получаем

$$\Delta q_{уст} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{2k}{(k_{ин}s^3 + k_дs^2 + k_пs + k_{ин})s} = \infty. \quad (14)$$

Из (14) следует, что ошибка растет неограниченно. Это подтверждается результатами моделирования (рис. 10): астатическая система показывает неограниченный рост ошибки, комбинированная – конечную ошибку небольшой величины.

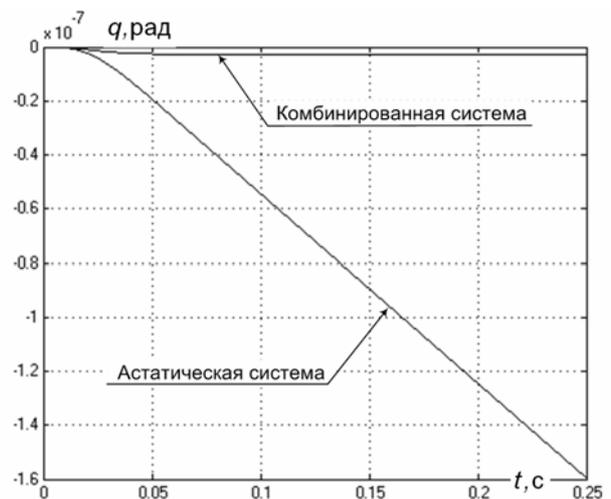


Рис. 10. Параболическая нагрузка

И наконец, выясним, какая ошибка будет при действии синусоидального возмущения:

$$Q_n = A \sin \omega t; \quad Q_n(s) = \frac{A\omega}{s^2 + \omega^2}; \quad \Delta q_{уст} = \frac{A}{k_{ин}\omega}. \quad (15)$$

Анализ выражений (15) показывает, что в астатической системе при гармонической нагрузке появляется периодически изменяющаяся ошибка.

Результаты моделирования показывают, что ошибка такого же характера, но значительно меньшей величины появляется и в комбинированной системе (рис. 11).

При моделировании приняты следующие параметры: $k_{ин} = 6,332 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; $f_{пр} = 6 \text{ Гц}$.

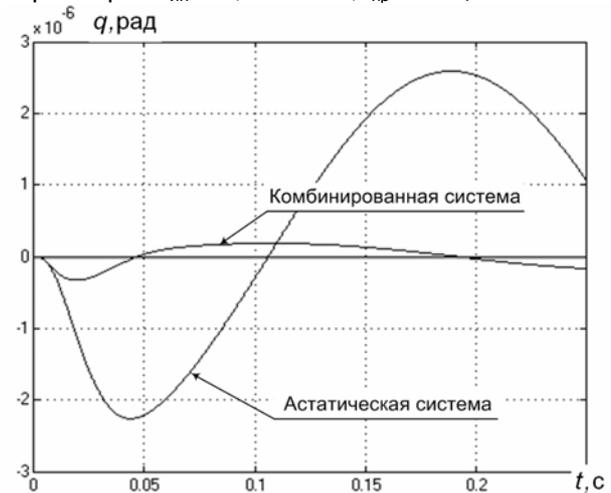


Рис. 11. Гармоническая нагрузка

Заключение

Предложенные структуры, методики расчета элементов и результаты исследования развивают теоретические и практические вопросы использования в электромеханотронных системах принципов комбинированного управления на основе использования наблюдателей нагрузки.

Полученные результаты моделирования подтверждают правильность принятых теоретических положений:

– показана эффективность использования в комбинированных электромехатронных системах позиционирования астатических регуляторов на основе модифицированного ПИД-регулятора с входным фильтром;

– применение в мехатронных системах настройки динамики на распределение корней по Бесселю, как в регуляторах, так и в наблюдателях, улучшает качество динамических характеристик.

Предложенная структура и методика расчета параметров наблюдателя нагрузки с астатизмом 1-го порядка по скорости модуля для модуля с жесткой механикой не содержат элементов, исключающих микропроцессорную реализацию [6], и могут быть распространены на электромехатронные системы различных конфигураций и назначения в машиностроении и робототехнике.

Список литературы

1. Kolganov A., Gnezdov N., Lebedev S. Application of Astatic State Observers in Electromechanotronic Modules // Scientific Journal of Riga Technical University. – 2010. – Vol. 27. – P. 151–154.
2. Колганов А.Р., Лебедев С.К., Гнездов Н.Е. Наблюдатели состояния и нагрузок современных электромехатронных систем // Труды Тульского государственного университета. – Тула, 2010. – Т. 3. – Ч. 2. – С. 18–23.
3. Лебедев С.К., Гнездов Н.Е., Коротков А.А. Выбор параметров стандартных распределений при синтезе электроприводов // Вестник ИГЭУ. – 2008. – № 3. – С. 14–16.
4. Мошиц Г., Хорн П. Проектирование активных фильтров. – М.: Мир, 1984. – 320 с.

Лебедев Сергей Константинович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок,
телефон (4932) 26-97-09,
e-mail: lebedev@drive.ispu.ru

Колганов Алексей Руфимович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой электропривода и автоматизации промышленных установок,
телефон (4932) 26-97-09,
e-mail: klgn@drive.ispu.ru

Гнездов Николай Евгеньевич,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок,
телефон (4932) 26-97-08,
e-mail: gnezdov@drive.ispu.ru

5. Лебедев С.К., Коротков А.А. Алгоритмы синтеза наблюдателей нагрузки электропривода // Вестник ИГЭУ. – 2009. – № 3. – С. 5–8.

6. Колганов А.Р., Лебедев С.К., Гнездов Н.Е. Микропроцессорная реализация наблюдателей состояния и нагрузки для электромехатронных модулей // Вестник ИГЭУ. – 2010. – № 2. – С. 66–69.

7. Колганов А.Р., Лебедев С.К., Гнездов Н.Е. Идентификация возмущений с заданной точностью в электромехатронных модулях // Приводная техника. – 2011. – № 3. – С. 13–19.

References

1. Kolganov, A., Gnezdov, N., Lebedev, S. Application of Astatic State Observers in Electromechanotronic Modules. *Scientific Journal of Riga Technical University*. Riga, 2010, vol. 27, pp. 151–154.
2. Kolganov, A.R., Lebedev, S.K., Gnezdov, N.E. Nablyudateli sostoyaniya i nagruzok sovremennykh elektromekhanotronnykh system [Conditions and Loads Observers of the Modern Electromechanotronic Systems]. *Trudy Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta* [Works of Tula State University]. Tula, 2010, vol. 3, part 2, pp. 18–23.
3. Lebedev, S.K., Gnezdov, N.E., Korotkov, A.A. Vybory parametrov standartnykh raspredeleniy pri sinteze elektroprivodov [Parameters Choice of Standard Distributions at Synthesis of Electric Drives]. *Vestnik IGEU*, 2008, no. 3, pp. 14–16.
4. Moshits, G., Khorn, P. *Proektirovanie aktivnykh fil'trov* [Active Filters Designing]. Moscow, Mir, 1984. 320 p.
5. Lebedev, S.K., Korotkov, A.A. Algoritmy sinteza nablyudateley nagruzki elektroprivoda [Synthesis Algorithms of Loads Observers of Electric Drive]. *Vestnik IGEU*, 2009, no. 3, pp. 5–8.
6. Kolganov, A.R., Lebedev, S.K., Gnezdov, N.E. Mikroprotsessornaya realizatsiya nablyudateley sostoyaniya i nagruzki dlya elektromekhanotronnykh moduley [Microprocessor Realization of Condition and Loads Observers for Electromechanotronic Modules]. *Vestnik IGEU*, 2010, no. 2, pp. 66–69.
7. Kolganov, A.R., Lebedev, S.K., Gnezdov, N.E. Identifikatsiya vozmushcheniy s zadannoy tochnost'yu v elektromekhanotronnykh modulyakh [Disturbance Identification with the Set Accuracy in Electromechanotronic Modules]. *Privodnaya tekhnika*, 2011, no. 3, pp. 13–19.