

Электромеханотронная система с нежесткой механикой и астатическим регулятором состояния

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

Авторское резюме

Состояние вопроса: Применение астатических регуляторов состояния в электромеханотронных системах с приводами переменного тока и учетом нежесткой механики недостаточно изучено. В связи с этим развитие таких систем является актуальной задачей.

Материалы и методы: При синтезе системы использованы методы теории пространства состояний, систем с переменной структурой, инструменты оптимизации *Matlab*. Экспериментальная проверка основных положений выполнена путем моделирования в *Simulink* и реализации системы в виде экспериментального образца.

Результаты: Предложена методика синтеза астатического регулятора состояния с переменной структурой для системы с нежесткой механикой, обеспечивающая заданную полосу пропускания при монотонности динамики. Выполнена микропроцессорная реализация системы, обеспечивающей ограничение заданных физических переменных в условиях изменения параметров, на экспериментальном образце.

Выводы: Полученные на экспериментальном экземпляре системы результаты подтверждают эффективность применения методики при создании систем с нежесткой механикой в условиях изменения параметров.

Ключевые слова: электропривод, упругие связи, регулятор состояния, микропроцессорное моделирование, робастность системы.

Electromechanotronic System with Nonrigid Mechanics and Astatic State Regulator

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

Abstract

Background: The application of the electromechanotronic systems with drives of alternating current and the account of nonrigid mechanics is not researched well. Thus, the development of astatic regulators of a state in such systems needs to be considered.

Materials and methods: The methods of the theory of state space representation, systems with variable structure, *Matlab* optimization tools were used for system synthesis. Experimental checkup of main features is executed by modeling in *Simulink* and system realization as an experimental sample.

Results: The technique of synthesis of the astatic state regulator with variable structure for system with the nonrigid mechanics, providing the set passband is offered in dynamics monotony. Microprocessor realization of system which provides the given physical variables in parameters changes is carried out.

Conclusions: The results received on an experimental system sample confirm the application efficiency of the technique while creating the systems with nonrigid mechanics in conditions of parameters changes.

Key words: electric drive, elastic connections, state controller, microprocess simulation, system robustness.

Автоматизация технологических процессов является основным путем решения актуальных задач повышения производительности труда и энергосбережения. При этом базой в создании промышленного оборудования стал электропривод переменного тока. Реально достигнутые полосы пропускания современных систем электропривода вынуждают учитывать упруго-вязкие, или нежесткие, связи в механической части.

Ранее нами выполнен анализ существующих подходов, предложено и опробовано решение задачи идентификации и управления состоянием механических переменных электропривода [1–5]. Для модели электропривода в виде безынерционного динамического звена, представ-

ляющего контур электромагнитного момента двигателя (M_d), и традиционной двухмассовой электромеханической системы (ЭМС) был предложен нелинейный безынерционный (статический) регулятор состояния с ограничением и оптимизацией внутреннего контура вязкоупругого момента [1, 6]. Но при такой модели контура M_d ограничена возможность повышения динамики регулятора механических переменных, а также, как правило, всегда ставится требование астатизма управляемой переменной. Для решения этих задач модель объекта (рис. 1) дополнена апериодическим звеном первого порядка, представляющим контур момента двигателя. Параметры механики приведены к валу двигателя.

Установив, что объект полностью управляем и наблюдаем, выполнили синтез астатического регулятора состояния (АРС) методом стандартных коэффициентов [7] в реальных (не фазовых) координатах (рис. 2). Для обеспечения монотонности переходных процессов скорости рабочей машины (РМ) Ω_2 приняли биномиальное распределение корней характеристического уравнения. Получили следующие значения коэффициентов АРС:

$$k_1 = -\frac{J_1 J_2 + (J_1 + J_2) b T_{эм} - 5 J_1 J_2 T_{эм} \omega_{0r}}{J_1 J_2 k_{эм}};$$

$$k_2 = \frac{T_{эм} (b^2 (J_1^2 + J_1 J_2 + J_2^2) - c J_1 J_2 (J_1^2 + J_2^2) + b J_1 J_2)}{J_1 J_2^2 k_{эм}} - \frac{T_{эм} 5 J_1 J_2 \omega_{0r} (b (J_1 + J_2) - 2 J_1 J_2 \omega_{0r})}{J_1 J_2^2 k_{эм}};$$

$$k_3 = \frac{T_{эм} J_1^2 J_2^2 \omega_{0r}^3 (b^2 \omega_{0r}^2 - 5 c b \omega_{0r} + 10 c^2)}{J_1 J_2^2 c^3 k_{эм}} + \frac{T_{эм} c^3 (J_1 J_2 (1 - 5 \omega_{0r} (J_1 + J_2) + b) + b (J_1^2 + J_2^2))}{J_1 J_2^2 c^3 k_{эм}};$$

$$k_4 = \frac{T_{эм} J_1^2 J_2^2 \omega_{0r}^2 (5 c J_2 \omega_{0r}^2 - c J_2 \omega_{0r}^3 - 10 c^2)}{J_1 J_2^2 c^2 k_{эм}} + \frac{T_{эм} c^2 (J_1 J_2 (c (J_1 + J_2) + 5 \omega_{0r} (b J_1 - J_2)))}{J_1 J_2^2 c^2 k_{эм}} + \frac{T_{эм} c^2 b (J_2^2 + 2 J_1 J_2 - b J_2^2)}{J_1 J_2^2 c^2 k_{эм}};$$

$$k_5 = \frac{J_1 J_2 T_{эм} \omega_{0r}^5}{b k_{эм}},$$

где J_1, J_2, c, b – параметры объекта; ω_{0r} – средне-геометрический корень системы.

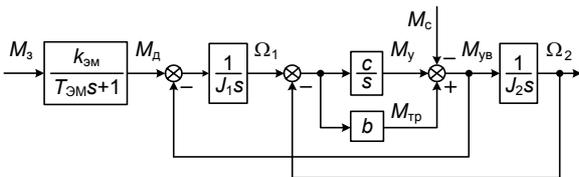


Рис. 1. Структурная схема объекта управления

При этом числитель передаточной функции между сигналом задания и скоростью второй массы (вала рабочей машины) имеет вторую степень оператора s . То есть для устранения влияния на переходные процессы в системе регулирования скорости нулей этой передаточной функции необходим входной фильтр:

$$H_f(s) = \frac{c k_5}{b s^2 + c s}.$$

Построение АРС в реальных, а не фазовых координатах позволяет выделить в синтезированной системе управления контур любой координаты и поставить на его входе ограничение. Обеспечение ограничений переменных во всех

режимах работы является обязательной задачей любой практической разработки. В рассматриваемой системе требуют ограничения моменты двигателя и механической передачи. Поскольку при разработке электропривода механика является исходной и обычно неизменной частью, а двигатель может быть выбран, в качестве ограничиваемой координаты принят упругий момент в механической передаче. Момент двигателя также ограничивается вследствие его определенной связи с моментом в передаче.

Уровень ограничения $S_{огр}$ определяется аналитически через передаточную функцию между входом и выходом выделенного контура упругого момента:

$$S_{огр} = \frac{M_{y,огр} c (J_1 + J_2 + J_2 k_3 k_{эм})}{J_2 k_{эм}}.$$

Наряду с требуемым ограничением упругого момента на заданном уровне, нелинейный АРС (рис. 2) обладает и негативной с точки зрения управления особенностью: на время действия ограничения система фактически размыкается по скоростям двигателя Ω_1 и выходного вала РМ Ω_2 и функционирует лишь замкнутый контур упругого момента с постоянным сигналом на входе, равным уровню ограничения.

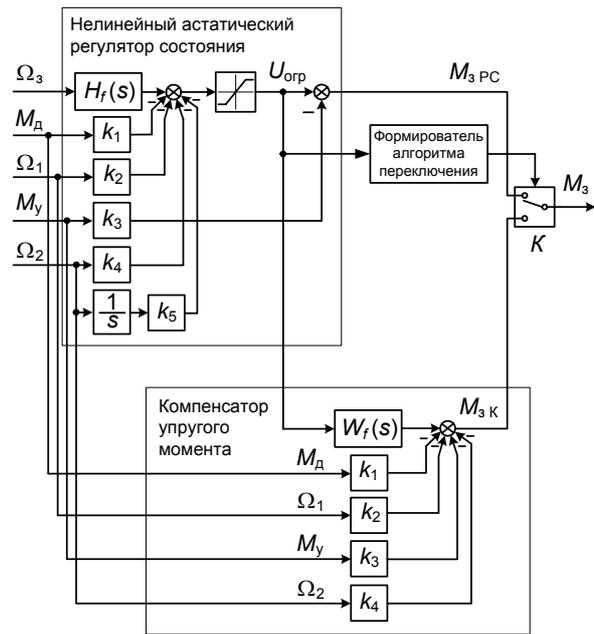


Рис. 2. Структурная схема нелинейного статического регулятора состояния переменной структуры

В этом случае вместо АРС с заданной оптимальной динамикой работает только контур упругого момента, динамика которого может не удовлетворять заданным требованиям. Поэтому контур упругого момента должен быть оптимизирован. Критерием оптимизации является требование монотонности переходных процессов в контуре упругого момента при действии ограничения в АРС. При этом быстродействие оптимизированного контура упругого момента должно быть не меньше быстродействия системы с АРС.

Для оптимизации процессов в контуре упругого момента изменили структуру нелинейного АРС на время действия ограничения. Схема нелинейного АРС переменной структуры представлена на рис. 2. Ниже уровня ограничения упругого момента линейный АРС обеспечивает монотонное изменение скорости выходного вала РМ. При превышении уровня ограничения структура переключается на компенсатор упругого момента, обеспечивающий монотонность переходных процессов этой координаты. Компенсатор состоит из регулятора состояния и входного фильтра, предназначенного для компенсации негативного влияния нулей передаточной функции в оптимизированном контуре упругого момента. В качестве задающего сигнала для компенсатора вязкоупругого момента рационально выбрать выходной сигнал блока ограничения $U_{орп}$, приняв во внимание отношение $M_{y,орп}/S_{орп}$ при определении передаточной функции входного фильтра компенсатора. В других случаях формировать задающий сигнал для компенсатора сложнее.

Изменение структуры АРС (рис. 2) осуществляется управляемым ключом K , который переключает выход регулятора M_3 с сигнала управления M_{3PC} , сформированного нелинейным РС, на сигнал управления $M_{3К}$, сформированный компенсатором момента, в соответствии со следующим алгоритмом:

$$M_3 = \begin{cases} M_{3PC} & \text{при } |M_{3PC}| < S_{орп}, \\ M_{3К} & \text{при } |M_{3PC}| \geq S_{орп}. \end{cases}$$

Отметим, что изменение структуры регулятора широко используется в современных ЭП. Переключение структуры легко реализуемо и является природным свойством (ветвление алгоритмов программ) микропроцессоров. Для корректной работы АРС при выходе из ограничения достаточно сбрасывать выход интегратора во время действия ограничения, что также легко реализуется в микропроцессоре.

Анализ вариантов компенсатора (регулятора) упругого момента показал, что при использовании традиционных П-, ПИ-, ИД-регуляторов динамика (среднегеометрический корень) контура не может быть выбрана и определяется параметрами объекта. Компенсатор с ПИД-регулятором получается относительно сложным в реализации за счет высокого порядка фильтра W_f (рис. 2). Поэтому для оптимизации контура упругого момента синтезирован регулятор и входной фильтр со следующими значениями коэффициентов и передаточной функцией:

$$k_1 = \frac{J_1 J_2 + J_1 b T_{эм} - 4 J_1 J_2 T_{эм} \omega_{ор}}{J_1 J_2 k_{эм}};$$

$$k_2 = \frac{T_{эм} J_1 J_2 \omega_{ор} (6 J_1 J_2 \omega_{ор} - 4 b (J_1 + J_2))}{J_1 J_2^2 k_{эм}} -$$

$$\frac{T_{эм} (c J_1 J_2 (J_1 + J_2) - J_1 b^2 (J_1 + 2 J_2))}{J_1 J_2^2 k_{эм}};$$

$$k_3 = \frac{T_{эм} (J_1^2 J_2^2 \omega_{ор}^3 (4c - b \omega_{ор}) - 4c J_1 J_2 \omega_{ор} (J_1 + c J_2))}{J_1 J_2^2 c^2 k_{эм}} + \frac{T_{эм} (bc^2 (J_1 + J_2)^2)}{J_1 J_2^2 c^2 k_{эм}};$$

$$k_4 = \frac{T_{эм} (J_1^2 J_2^2 \omega_{ор}^2 (J_2 \omega_{ор}^2 - 6c) + 4bc J_1 J_2 \omega_{ор} (J_1 + J_2))}{J_1 J_2^2 c k_{эм}} + \frac{T_{эм} (J_1 J_2 c^2 (J_1 + J_2) - b^2 c (J_1 + J_2)^2)}{J_1 J_2^2 c k_{эм}};$$

$$W_f(s) = \frac{k_2 + k_4}{J_2 s}.$$

Моделирование разработанной системы было выполнено в пакете *Simulink Matlab* и на экспериментальном образце (рис. 3). В первом случае можно говорить о структурном, во втором – о численном моделировании, когда алгоритм представляется в виде системы дифференциальных уравнений с последующим ее решением одним из методов численного интегрирования. Использование в качестве аппаратной базы прототипа реальной микропроцессорной системы управления позволяет говорить о микропроцессорном моделировании, создании экспериментального образца и утверждать, что полученные на нем результаты будут достигнуты и в реальной системе электропривода.

Численные значения параметров объекта приняты следующими: $J_1 = 0,055 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, $J_2 = 0,277 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, $c = 553,633 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{рад}$, $b = 0,83 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$. Среднегеометрический корень (СГК), т.е. динамика регулятора, выбран равным $628 \text{ рад}/\text{с}$. С учетом аналитических соотношений СГК и полосы пропускания для биномиального распределения корней [8] это обеспечивает полосу пропускания при регулировании скорости РМ Ω_2 , равную 30 Гц .



Рис. 3. Внешний вид экспериментального образца

В результате коэффициенты АРС имеют следующие значения: $k_1 = 5,21$; $k_2 = 208,06$; $k_3 = 89,33$; $k_4 = 4627,05$; $k_5 = 335991,83$, а коэффициенты компенсатора упругого момента – $k_1 = 8,98$; $k_2 = 508,0$; $k_3 = 289,1$; $k_4 = 16612,6$.

Отметим, что поскольку для реализации выбран микроконтроллер с сопроцессором, выполняющим операции во *float*-формате [9], проблем, связанных с квантованием переменных по уровню, не возникает. Также практически отсутствуют ограничения по выбору полосы пропускания (СГК) системы при синтезе алгоритмов управления.

На рис. 4, 5 представлены переходные процессы регулируемых координат – скорости рабочей машины и момента в передаче в режимах разгона, реверса, наброса нагрузки и торможения.

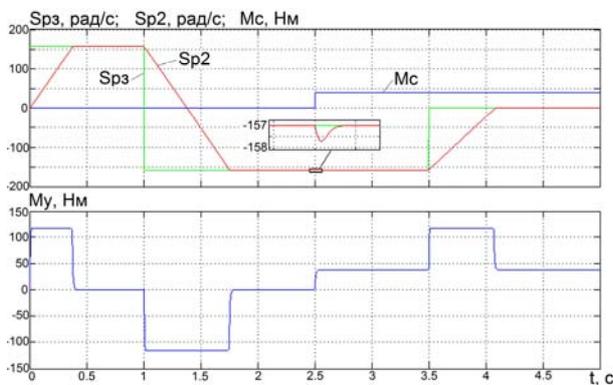


Рис. 4. Временные характеристики разработанной системы, полученные в *Simulink Matlab*

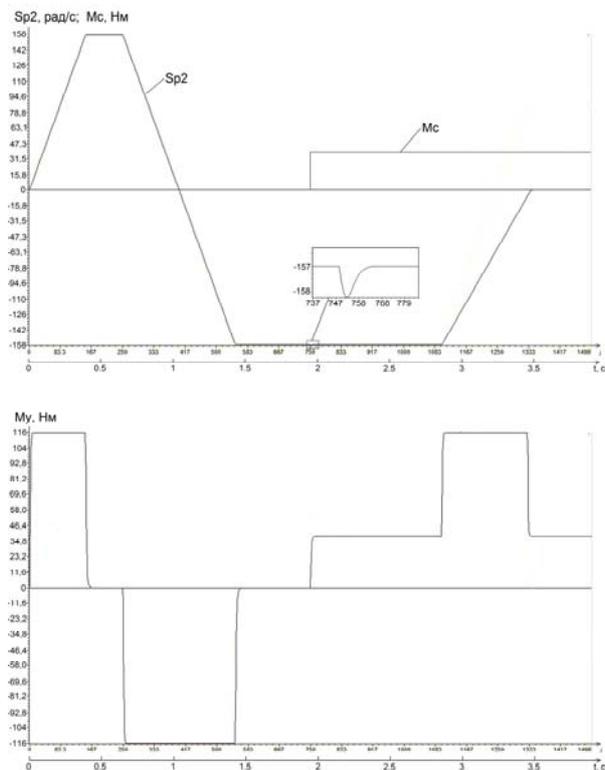


Рис.5. Временные характеристики разработанной системы, полученные на экспериментальном образце

Для успешной реализации разработанной системы необходимо обеспечение робастности, т.е. сохранение ее работоспособности и основных показателей качества при вариации параметров объекта. Эта задача решена с использованием обобщенной методики настройки параметров регуляторов состояния, предложенной в [1]. Ее суть заключается в исследовании влияния как отклонений каждого параметра объекта в отдельности, так и всех их сочетаний, в определении наихудшего сочетания отклонений и в настройке регулятора именно на эти значения параметров объекта.

Для принятого диапазона изменений параметров механики: J_1 на 50 %, J_2 в 5 раз, c и b в 2 раза, – определили, что наихудшей является ситуация, когда $J_1 \cdot 1,5$, $J_2/5$, $c/2$, $b/2$. На рис. 6 представлены переходные процессы в системе при настройке регулятора на параметры механической части $J_1 \cdot 1,5$, $J_2/5$, $c/2$, $b/2$.

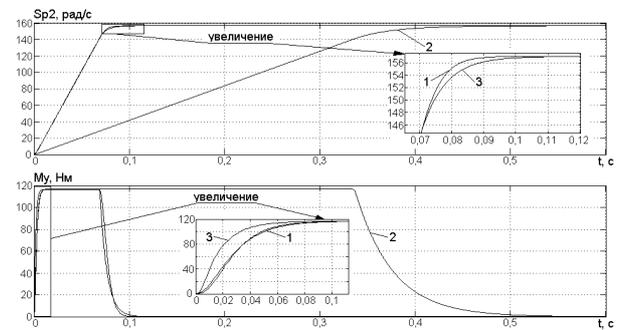


Рис. 6. Временные характеристики при вариации параметров объекта после оптимизации параметров регулятора: кривая 1 – при $J_1 \cdot 1,5$, $J_2/5$, $c/2$, $b/2$, кривая 2 – при исходных параметрах механической части, кривая 3 – при $J_1/1,5$, $J_2/5$, $c-2$, $b/2$

Анализ полученных кривых (рис. 6) позволяет утверждать, что задача обеспечения робастности решена: сохранены как монотонность, причем не только изменения скорости РМ, но и момента в передаче, так и быстродействие системы при вариациях параметров объекта в принятом диапазоне.

Таким образом, предложенная методика синтеза и реализации алгоритмов управления электроприводом с нежесткой механикой позволяют обеспечить:

- требуемые показатели динамики (вид переходных процессов, полоса пропускания) и статика (астатизм) электропривода;
- ограничение координат системы на заданном уровне (физических ограничений);
- робастность системы;
- готовность к отладке на объекте (алгоритмы отлажены в микропроцессорной системе управления).

Список литературы

1. Гнездов Н.Е. Многосвязный асинхронный электропривод с векторным управлением и нежесткой механикой

кой: дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03: защищ. 27.02.2009: утв. 15.05.2009. – Иваново, 2009. – 191 с.

2. **Анализ** вариантов построения регуляторов и наблюдателей САУ с упругими связями / А.Б. Виноградов, В.Ф. Глазунов, Н.Е. Гнездов, С.К. Лебедев // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2003. – № 5. – С. 87–93.

3. **Глазунов В.Ф., Гнездов Н.Е., Лебедев С.К.** Разработка и исследование многодвигательных систем электроприводов переменного тока с нежесткой механикой // Вестник ИГЭУ. – 2005. – Вып. 3. – С. 6–11.

4. **Колганов А.Р., Лебедев С.К., Гнездов Н.Е.** Наблюдатели состояния и нагрузок современных электромеханотронных систем // Тр. Тульского государственного университета. Т. 3. Ч. 2. – Тула, 2010. – С. 18–23.

5. **Kolganov A., Gnezdov N., Lebedev S.** Application of astatic state observers in electromechanotronic modules // Scientific Journal of Riga Technical University. – Riga, 2010. – Vol. 27. P. 151–154.

6. **Система** управления асинхронным электроприводом с нелинейным модальным регулятором переменной структуры / А.Б. Виноградов, В.Ф. Глазунов, Н.Е. Гнездов, С.К. Лебедев // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2005. – № 2. – С. 87–90.

7. **Кузовков Н.Т.** Модальное управление и наблюдающие устройства. – М.: Машиностроение, 1976. – 184 с.

8. **Лебедев С.К., Гнездов Н.Е., Коротков А.А.** Выбор параметров стандартных распределений при синтезе электроприводов // Вестник ИГЭУ. – 2008. – Вып. 3. – С. 14–16.

9. **Пантелейчук А.** Первые цифровые сигнальные контроллеры с плавающей точкой // Новости электроники. – 2007. – № 9. – С. 21–22.

References

1. Gnezdov, N.E. *Mnogosvyaznyy asinkhronnyy elektropriwod s vektornym upravleniem i nezhestkoy mekhanikoy*. Diss. kand. tekhn. nauk [The Multilinked Asynchronous Electric Drive with Vector Control and Nonrigid Mechanics. Cand. tech. sci. diss.]. Ivanovo, 2009. 191 p.

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

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: klg@drive.ispu.ru

2. Vinogradov, A.B., Glazunov, V.F., Gnezdov, N.E., Lebedev, S.K. *Analiz variantov postroeniya regulyatorov i nablyudateley SAU s uprugimi svyazyami* [The Analysis of Construction Variants of Regulators and ACS Observers with Elastic Connections]. *Izvestiya vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti*, 2003, no. 5, pp.87–93.

3. Glazunov, V.F., Gnezdov, N.E., Lebedev, S.K. *Razrabotka i issledovanie mnogodvigatel'nykh sistem elektroprivodov peremennogo toka s nezhestkoy mekhanikoy* [Development and Research of Alternating Current Multimotor Systems of Electric Drives with Nonrigid Mechanics]. *Vestnik IGEU*, 2005, no. 3, pp. 6–11.

4. Kolganov, A.R., Lebedev, S.K., Gnezdov, N.E. *Nablyudateli sostoyaniya i nagruzok sovremennykh elektromekhanotronnykh sistem* [Observers of States and Loadings of Modern Electromechanotronic Systems]. *Trudy Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta, t. 3, chast' 2* [Works of Tula State University, Vol. 3, Chapter 2]. Tula, 2010, pp. 18–23.

5. 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.

6. Vinogradov, A.B., Glazunov, V.F., Gnezdov, N.E., Lebedev, S.K. *Sistema upravleniya asinkhronnym elektropriwodom s nelineynym modal'nym regulyatorom peremennoy struktury* [Control System of the Asynchronous Electric Drive with Nonlinear Modal Regulator of Variable Structure]. *Izvestiya vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti*, 2005, no. 2, pp. 87–90.

7. Kuzovkov, N.T. *Modal'noe upravlenie i nablyudayushchie ustroystva* [Modal Control and Observing Devices]. Moscow, Mashinostroenie, 1976. 184 p.

8. Lebedev, S.K., Gnezdov, N.E., Korotkov, A.A. *Vybor parametrov standartnykh raspredeleniy pri sinteze elektroprivodov* [Parameters Choice of Standard Distributions in Synthesis of Electric Drives]. *Vestnik IGEU*, 2008, no. 3, pp. 14–16.

9. Panteleychuk, A. *Pervye tsifrovye signal'nye kontrolyery s plavayushchey tochkoj* [The First Digital Signal Controllers with a Floating Point]. *Novosti elektroniki*, 2007, no. 9, pp. 21–22.