

УДК 621.3.078:681.513.66

## СЛЕДЯЩИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ С АДАПТИВНЫМИ К ЗАДАЮЩИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ ЭТАЛОННЫМИ МОДЕЛЯМИ

**Казанцев В.П., Лыков А.Н., Даденков Д.А.**

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Пермь, e-mail: dadenkov@mail.ru*

Рассмотрены вопросы повышения динамической точности обработки следящими электроприводами произвольно меняющегося задающего воздействия за счет обеспечения частичной инвариантности и астатического регулирования. Показано, что повышение добротности следящих электроприводов и упрощение процедуры синтеза регулятора положения и корректирующих звеньев в параллельных каналах компенсации позиционной и скоростной ошибки возможно за счет предварительного формирования оптимальных по быстродействию и точности фазовых переменных электропривода, таких как положение, скорость, ускорение и, в общем случае, рывок. Для этого предлагается вместо стационарных задатчиков интенсивности второго рода (позиционной и скоростной S-рампы) на входах замкнутых контуров регулирования положения и скорости установить адаптивную к параметрам задающего воздействия эталонную модель изменения этих фазовых переменных во времени. Показано, что при этом существенно упрощается процесс синтеза регуляторов и параллельных корректирующих звеньев электропривода, а также настройки (параметрирования) микропроцессорного контроллера. Представлены функциональные схемы следящего квазиинвариантного к задающим воздействиям электропривода и адаптивной эталонной модели, а также результаты имитационного моделирования, подтверждающие эффективность предложенных технических решений.

**Ключевые слова:** следящий электропривод, адаптивная эталонная модель, фазовые переменные, добротность, астатизм, имитационное моделирование

## SERVO DRIVE SYSTEMS WITH ADAPTIVE TO POSITION COMMANDS REFERENCE MODELS

**Kazantsev V.P., Lykov A.N., Dadenkov D.A.**

*Perm National Research Polytechnic University, Perm, e-mail: dadenkov@mail.ru*

The problems of improving the dynamic accuracy of servo drives with arbitrarily changing setpoint by providing partial invariance and astatic control are considered. It is shown that increase of good quality of servo drives and simplification of procedure of synthesis of the position regulator can be realized with use of preliminary formation optimum on high-speed performance and accuracy of phase variables of the electric drive, such as position, speed, acceleration and breakthrough. It is for this purpose instead of stationary intensity actuators of the second kind (positional and high-speed S-ramp) on inputs of closed circuits of regulation of position and speed is set a reference model which provides optimal formation of these phase variables over time. It is shown that significantly simplifies the process of synthesis of regulators and parallel corrective link of electric drive, as well as the parameterization of microprocessor controller. The functional diagram of servo drive quasiinvariant to the input signal and the adaptive reference model, and also the results of simulation modeling confirming efficiency of the proposed technical solutions are provided.

**Keywords:** electric servo drive, adaptive reference model, phase variables, servo quality, astatic control, simulation

Современные следящие электроприводы (СЭП) обеспечивают очень высокие показатели качества обработки задающих и возмущающих воздействий, причем заявленное производителями время переходных процессов маломощных сервоприводов по контуру регулирования положения не превышает 20–60 мс, а полоса пропускания замкнутого контура регулирования положения уже достигает уровня 100–300 Гц.

При современном уровне развития теории оптимального и адаптивного управления, микропроцессорной и силовой полупроводниковой схемотехники контур регулирования момента является практически безынерционным и его, как правило, в задачах синтеза и анализа СЭП аппроксимируют простейшим аperiodическим звеном первого порядка с ничтожно малой посто-

янной времени, не превышающей нескольких миллисекунд, а для маломощных сервоприводов – долей миллисекунд [13–15]. Однако доминирующую роль в формировании показателей качества технологических процессов с применением СЭП играют его фазовые переменные – скорость вращения и положение вала электродвигателя или линейные скорость и перемещение рабочего органа, что предполагает необходимость повышения быстродействия именно этих фазовых переменных. При этом традиционная архитектура СЭП не меняется уже несколько десятилетий, базируется на принципах подчиненного регулирования координат [1–5], и замкнутый контур регулирования положения включает в себя подчиненные контуры регулирования скорости и момента (тока).

### Постановка задачи исследований

Для ограничения фазовых переменных в современных СЭП на входе замкнутых контуров регулирования положения и скорости устанавливают задатчики интенсивности первого или, что чаще, второго рода ( $S$ -рампы) и различные фильтры нижних частот, режекторные фильтры и др. [5, 13–15]. Это требует задания как минимум трех параметров  $S$ -рампы – величин допустимого ускорения и замедления, предельной скорости, величины предельно допустимого момента или механического рывка электропривода и времени их действия, а также постоянных времени фильтров или временных задержек изменения задающих сигналов. Это позволяет ограничить фазовые переменные СЭП на допустимых уровнях при изменении задания положения электропривода. Однако соподчиненность контуров регулирования положения, скорости и момента с включенными  $S$ -рампами и фильтрами на входах контуров приводит к ряду отрицательных последствий [2–5, 9]:

– неминуемое снижение быстродействия внешнего контура регулирования положения вследствие необходимости специфического распределения корней характеристических полиномов соподчиненных контуров в соответствии с фильтрами Баттерворта или аналогичными фильтрами низких частот, что принципиально не позволяет достичь предельного быстродействия отработки ошибок СЭП;

– обеспечение астатизма за счет введения интегральных компонент в структуры контурных регуляторов требует установки и параметрирования предшествующих фильтров для снижения перерегулирования или принятия специальных мер для исключения эффекта «накопленной ошибки», что дополнительно усложняет настройку микропроцессорных контроллеров СЭП, требует от наладчика детального изучения инструкций по наладке, знания тонкостей теории автоматического управления при вводе значений многочисленных параметров;

– включение инерционных звеньев ( $S$ -рампы и предшествующих фильтров) до компенсирующих позиционную и скоростную ошибки связей заведомо усугубляет условия для достижения хотя бы частичной инвариантности по отношению к задающим воздействиям.

Таким образом, анализ современного состояния СЭП позволил выделить три актуальных задачи исследований:

– разработка адаптивной к параметрам задающего воздействия эталонной модели (АЭМ), обеспечивающей формирование

фазовых переменных СЭП (скорости, ускорения и рывка) с предельным быстродействием при заданных ограничениях;

– разработка процедуры синтеза регулятора положения и корректирующих звеньев для обеспечения частичной инвариантности СЭП и требуемого порядка астатизма по задающим воздействиям;

– имитационное моделирование разработанных СЭП для оценки таких показателей.

Рассмотрим обобщенную функциональную схему, содержащую две замкнутые обратными связями подсистемы (рис. 1).

1. Замкнутую подсистему адаптивной эталонной модели (АЭМ), включающую объект управления АЭМ – ОУ АЭМ, представляющий собой интегратор  $n$ -го порядка (для определенности в дальнейшем будем полагать, что  $n = 2$ ), устройство управления АЭМ – УУ АЭМ, устройство вычисления периода управления – УВПУ.

2. Замкнутую подсистему собственно СЭП.

АЭМ включена на входе подсистемы СЭП и представляет собой адаптивный к параметрам внешней среды задатчик интенсивности того или иного порядка в зависимости от порядка интегратора АЭМ.

Обозначения переменных:  $\mathbf{X}^{**}(t)$  – задающее воздействие внешней среды (в данном случае положения СЭП),  $\mathbf{X}^{**}(t) = x_1^{**}(t)$ ;  $\mathbf{X}_{\max}^*(t)$  – заданный вектор ограничений фазовых переменных СЭП, в общем случае допускающий изменения во времени; для АЭМ 2-го порядка

$$\mathbf{X}_{\max}^*(t) = [x_{2\max}^*(t) \quad x_{3\max}^*(t)]^T,$$

где  $x_{2\max}^*(t)$ ,  $x_{3\max}^*(t)$  – предельно допустимые значения скорости и ускорения электропривода, причем  $x_{3\max}^*(t) = U_{\max}(T_i)$ ;  $T_{\min}$  – минимальное значение периода дискретного управления, определяющее полосу пропускания АЭМ в режиме малых отклонений переменных АЭМ и ограничивающее тем самым полосу пропускания разомкнутого тракта АЭМ – СЭП;  $\mathbf{X}^*(t)$  – вектор фазовых переменных эталонной модели,  $\mathbf{X}^*(t) = [x_1^*(t) \quad x_2^*(t)]$ ;  $\mathbf{F}(t)$  – вектор возмущений внешней среды, к основной компоненте которого относят изменение нагрузки на валу электропривода.

Вектор  $\mathbf{X}(t)$  состояния СЭП содержит как минимум три компоненты: положение, скорость и электромагнитный момент (ток), но может содержать некоторый набор дополнительных переменных в зависимости от степени детализации элементов СЭП.

Будем полагать, что процессы в замкнутой АЭМ описываются дискретно-непрерывным уравнением:

$$\dot{\mathbf{X}}^*(t) = \mathbf{A}^* \mathbf{X}^*(t) + \mathbf{B}^* U(T_i), \quad (1)$$

где  $U(T_i)$  – дискретное (цифровое) управление интеграторами эталонной модели,

$$U(T_i) = \mathbf{\beta}(T_i) (\mathbf{X}^{**}(t) - \mathbf{X}^*(t)), \quad (2)$$

где  $T_i$  – период цифрового управления эталонной модели, изменяемый в некоторые  $i$  – моменты времени изменения задания внешней среды,  $i = 1, 2, \dots$ ,  $\mathbf{\beta}(T_i)$  – матрица искоемых параметров управления АЭМ, зависящих от варьируемого периода  $T_i$  цифрового управления АЭМ,  $\mathbf{A}^*$  – матрица со-

стояния АЭМ,  $\mathbf{A}^* = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{B}^*$  – матрица управления АЭМ,  $\mathbf{B}^* = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ .

Полагая, что АЭМ формирует оптимальные по быстродействию изменения выходной переменной, для нахождения неизвестных параметров матрицы  $\mathbf{\beta}(T_i)$  воспользуемся теоремой об  $n$  интервалах цифровых финитных систем управления и методикой синтеза, детально рассмотренной в [6–8]. С учетом принятых моделей (1), (2) ниже представлены результаты синтеза для АЭМ второго порядка:

$$\mathbf{\beta}(T_i) = \begin{bmatrix} 1/T_i^2 & 1,5/T_i \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где  $T_i = \sqrt{\frac{\Delta x_1^*(T_i)}{X_{3\max}^*(t)}}$  – расчетное значение периода дискретного управления,  $\Delta x_1^*(T_i) = x_1^{**}(T_i) - x_1^*(T_i)$  – приращение задания выходной переменной АЭМ в некоторый заранее неизвестный  $i$ -й момент времени изменения задающего воздействия.

Обобщенная функциональная схема СЭП, соответствующая общепринятым структурам следящих электроприводов мировых производителей [5, 13–15], приведена на рис. 2.

Заметим, что при наличии АЭМ, формирующей вектор заданных фазовых переменных СЭП, корректирующие динамические звенья, обеспечивающие компенсацию позиционной и скоростной ошибки, становятся структурно проще. Несложно показать, что вместо дискретного ПДД-корректирующего звена достаточно применить два пропорциональных звена между выходами АЭМ по заданию скорости и ускорения и, соответственно, входами регуляторов скорости и момента. При этом СЭП обрабатывает эталонные задающие воздействия  $X^*(t)$  сразу нескольких фазовых переменных. В общем случае (при  $n = 3$ ) – это заданное положение рабочего органа и его три производных по времени – скорость, ускорение, рывок. При  $n = 2$  задание рывка отсутствует.

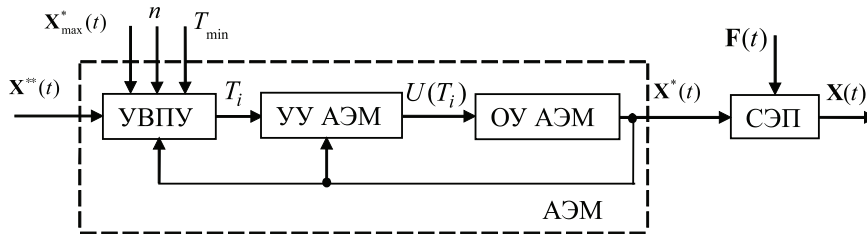


Рис. 1. Обобщенная функциональная схема СЭП с АЭМ

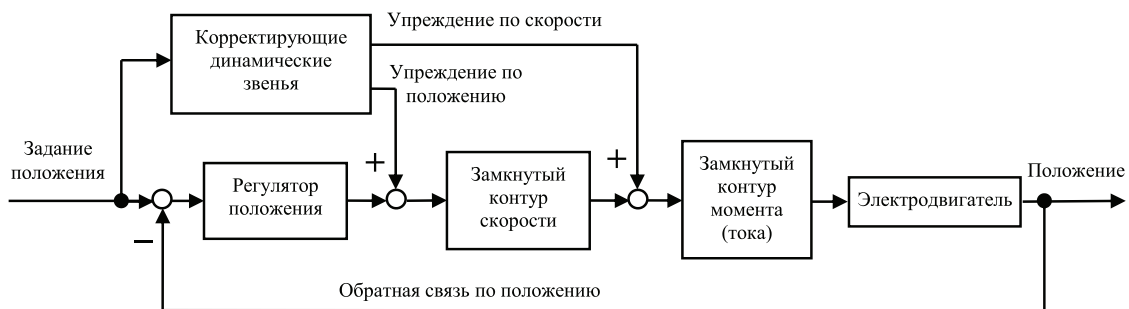


Рис. 2. Обобщенная функциональная схема СЭП

При использовании цифрового регулятора состояния в качестве регулятора положения ситуация аналогична, т.к. результат его синтеза дает равные коэффициенты по заданию и обратным связям [6, 10, 12], что эквивалентно одновременной обработке вектора ошибок слежения по координатам положения, скорости и ускорения. Именно это обстоятельство позволяет существенно увеличить добротности СЭП по скорости и ускорению, сводя динамическую установившуюся ошибку слежения при типовых степенных тестовых воздействиях практически к нулю. Разумеется, для того, чтобы обеспечить высокую добротность СЭП еще и по рывку, необходимо применить АЭМ как минимум 3-го порядка. Заметим, что регулятор состояния может быть синтезирован как для структуры с подчиненными контурами скорости и момента (тока), так и только с подчиненным контуром момента (тока).

На рис. 3 приведены результаты моделирования переходных процессов в АЭМ. Приведены сформированные эталонной моделью сигналы задания трех фазовых переменных (сверху вниз) – положения, скорости и ускорения при следующих приращениях задающих воздействий на входе АЭМ: 0,05 рад при  $t = 0$  с, 0,95 рад при  $t = 0,2$  с и 9 рад при  $t = 1$  с.

Заметим, что период дискретизации в АЭМ при формировании эталонных фазовых переменных СЭП меняется таким образом, что реализуется предельное быстродействие при заданных ограничениях фазовых переменных, а также формирова-

ние зоны линейной работы АЭМ заданием минимального значения  $T_{\min}$ . В этой зоне время переходного процесса неизменно, равно  $nT_{\min}$ , а заданное ускорение не достигает допустимого ограничения.

На рис. 4, а приведены результаты моделирования переходных процессов по положению, скорости и ускорению (сверху вниз) в сквозном тракте АЭМ-СЭП при «постоянной заводке по ускорению» на уровне 50 рад/с<sup>2</sup>. Такт дискретного управления принят равным 0,001 с. В момент времени, равный 0,1 секунды, имитируется реакция СЭП на ступенчатое приложение к валу двигателя номинальной нагрузки.

На рис. 4, б приведены результаты моделирования переходных процессов в сквозном тракте АЭМ-СЭП с цифровым регулятором состояния (положение, скорость, ускорение) и подчиненным контуром регулирования тока якоря при тех же параметрах объекта управления и тестовых воздействиях, что и в предыдущем случае. Синтез регулятора состояния выполнен по критерию финитного управления [10, 12] за три интервала дискретного управления с постоянным периодом, равным 0,02 секунды.

Анализ результатов моделирования позволяет сделать следующие выводы:

– АЭМ формирует оптимальные по быстродействию задания фазовых переменных, причем ограничение ускорения на уровне 50 рад/с<sup>2</sup> и ограничение сигнала дискретного управления АЭМ происходит только при достаточно больших приращениях задания положения, сформированных внешней средой (см. рис. 3);

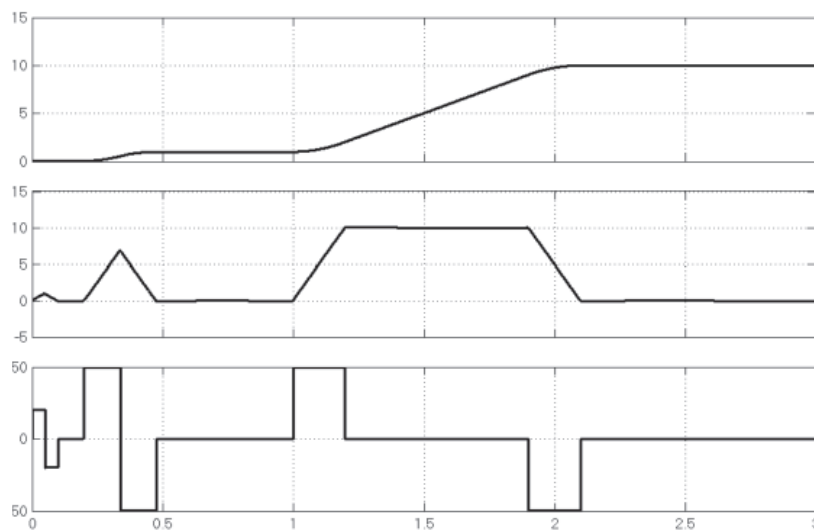
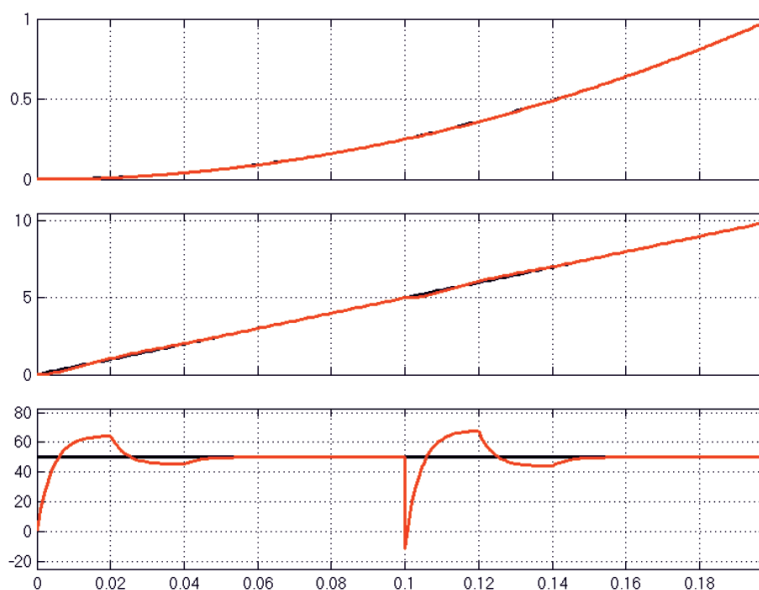
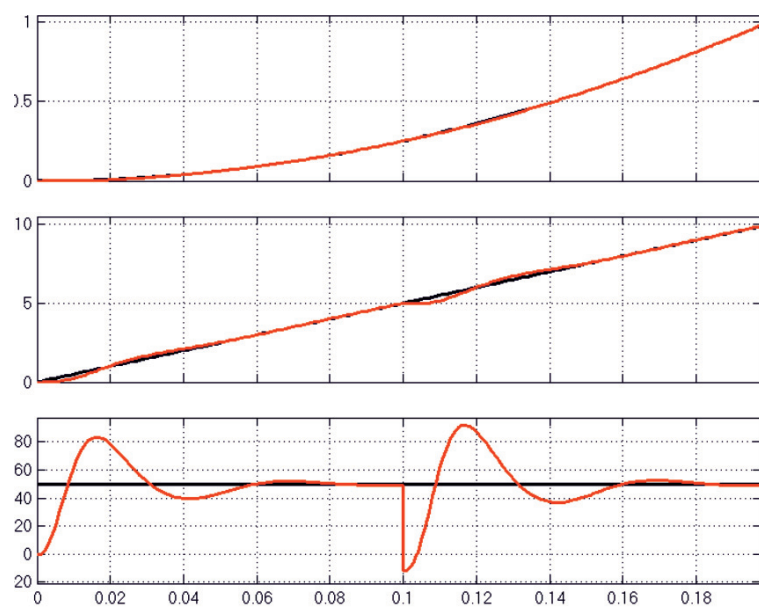


Рис. 3. Результаты моделирования процессов в АЭМ



а)



б)

Рис. 4. Результаты моделирования процессов в СЭП с типовой структурой (а) и с финитным регулятором состояния (б)

– обе СЭП обрабатывают эталонное задание фазовых переменных с минимальной инерцией, практически дублируя задание (см. рис. 4, а–б);

– в СЭП с финитным регулятором состояния по сравнению с типовой СЭП до-

бротность по ускорению в 4,3 раза выше и достигает уровня  $6,5 \cdot 10^5 \text{ с}^{-2}$ , а динамическая ошибка слежения – во столько же раз меньше при равных условиях моделирования и примерно равном времени переходных процессов (0,06 с).



### Заключение

В результате проведенных исследований предложен новый подход к построению предельных по быстродействию и точности следящих электроприводов с адаптивными к параметрам задающих воздействий эталонными моделями. На основе предложенного подхода разработана оригинальная методика синтеза эталонных моделей, обеспечивающих оптимальность формирования до четырех фазовых переменных СЭП по критерию быстродействия с формированием переменного такта дискретного управления. При этом в эталонной модели реализуется возможность ограничения фазовых переменных на допустимых уровнях, что позволяет при синтезе регуляторов СЭП применить широкий арсенал методов линейной теории управления и упростить тем самым структуру и настройку системы управления. Результаты имитационного моделирования предложенных структур СЭП с АЭМ подтвердили эффективность предложенного подхода.

### Список литературы

1. Батоврин А.А., Дашевский П.Г., Лебедев В.Д., Марков Б.А. Цифровые системы управления электроприводами. – Л.: Энергия, 1977. – 256 с.
2. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 392 с.
3. Борцов Ю.А., Поляхов Н.Д., Путов В.В. Электромеханические системы с адаптивным и модальным управлением. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 216 с.
4. Герман-Галкин С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб: Изд-во Корона-Век, 2014. – 368 с.
5. Гусев Н.В., Букреев В.Г. Системы цифрового управления многокоординатными следящими электроприводами: учебное пособие / Н.В. Гусев, В.Г. Букреев – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2007. – 213 с.
6. Даденков Д.А., Казанцев В.П. Синтез электромеханических систем управления с нелинейной адаптивной эталонной моделью // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – № 11–7. – С. 1466–1471.
7. Даденков Д.А., Казанцев В.П., Ляхомский А.В. Принципы построения адаптивных электромеханических систем управления с эталонными моделями // *Электротехника*. – 2015. – № 6. – С. 45–50.
8. Даденков Д.А., Казанцев В.П., Муравьев Д.И. Электромеханические системы управления с адаптивными к внешней среде эталонными моделями // *Фундаментальные исследования*. – 2015. – № 8–1. – С. 99–104.
9. Дорф Р. Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп. Пер. с англ. Б.И. Копылова. Научное издание. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. – 832 с.
10. Казанцев В.П., Даденков Д.А. Методика синтеза следящих электромеханических систем управления с адаптивными эталонными моделями // *В мире научных открытий*. № 10.2(70): Естественные и технические науки – 2015. – С. 728–741.
11. Казанцев В.П., Даденков Д.А. Эталонные модели для систем управления фазовыми переменными технологических процессов и установок // *Электротехнические комплексы и системы управления*. – 2014. – № 3. – С. 57–61.
12. Казанцев В.П., Даденков Д.А. Программный комплекс «Синтез и анализ цифровых систем управления». Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2013660457 от 06.11. 2013 г.
13. Серводвигатели и сервопривод НПФ «Электропривод». [Электронный ресурс], URL: <http://dmotor.ru/products.htm> (дата обращения: 20.11.2016).
14. Сервосистемы Delta Electronics [Электронный ресурс]. URL: <http://www.deltronics.ru/product/servo/> (дата обращения: 20.11.2016).
15. Приводная электроника «SEW-EURODRIVE» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sew-eurodrive.ru/catalog/2/10.html> (дата обращения: 20.11.2016).

### References

1. Batovrin A.A., Dashevskij P.G., Lebedev V.D., Markov B.A. Cifrovye sistemy upravlenija jelektroprivodami. L.: Jenergija, 1977. 256 p.
2. Basharin A.V., Novikov V.A., Sokolovskij G.G. Upravlenie jelektroprivodami. L.: Jenergoizdat, 1982. 392 p.
3. Borcov Ju.A., Poljahov N.D., Putov V.V. Jelektromehaničeskie sistemy s adaptivnym i modalnym upravleniem L.: Jenergoatomizdat, 1984. 216 p.
4. German-Galkin S.G. Matlab & Simulink. Proektirovanie mehatronnyh sistem na PK. SPb: Izd-vo Korona-Vek, 2014. 368 p.
5. Gusev N.V., Bukreev V.G. Sistemy cifrovogo upravlenija mnogokoordinatnymi sledjashimi jelektroprivodami: uchebnoe posobie / N.V. Gusev, V.G. Bukreev Tomsk: Izd-vo Tomskogo politehnicheskogo universiteta, 2007. 213 p.
6. Dadenkov D.A., Kazancev V.P. Sintez jelektromehaničeskih sistem upravlenija s nelinejnoj adaptivnoj jetalonnoj modelju // *Fundamentalnye issledovanija*. 2014. no. 11–7. pp. 1466–1471.
7. Dadenkov D.A., Kazancev V.P., Ljahomskij A.V. Principy postroenija adaptivnyh jelektromehaničeskih sistem upravlenija s jetalonnymi modeljami // *Jelektrotehnika*. 2015. no. 6. pp. 45–50.
8. Dadenkov D.A., Kazancev V.P., Muravev D.I. Jelektromehaničeskie sistemy upravlenija s adaptivnymi k vneshnej srede jetalonnymi modeljami // *Fundamentalnye issledovanija*. 2015. no. 8–1. pp. 99–104.
9. Dorf R. Sovremennye sistemy upravlenija / R. Dorf, R. Bishop. Per. s angl. B.I. Kopylova. Nauchnoe izdanie. M.: Laboratorija Bazovyh Znanij, 2002. 832 p.
10. Kazancev V.P., Dadenkov D.A. Metodika sinteza sledjashih jelektromehaničeskih sistem upravlenija s adaptivnymi jetalonnymi modeljami // *V mire nauchnyh otkrytij*. no. 10.2(70): Estestvennye i tehničeskie nauki 2015. pp. 728–741.
11. Kazancev V.P., Dadenkov D.A. Jetalonnye modeli dlja sistem upravlenija fazovymi peremennymi tehnologičeskih processov i ustanovok // *Jelektrotehnicheskie komplekсы i sistemy upravlenija*. 2014. no. 3. pp. 57–61.
12. Kazancev V.P., Dadenkov D.A. Programmnyj kompleks «Sintez i analiz cifrovyh sistem upravlenija». Svidetelstvo ob oficialnoj registracii programmy dlja JeVM no. 2013660457 ot 06.11. 2013 g.
13. Servodvigateli i servoprivod NPF «Jelektroprivod». [Jelektronnyj resurs], URL: <http://dmotor.ru/products.htm> (data obrashhenija: 20.11.2016).
14. Servosistemy Delta Electronics [Jelektronnyj resurs]. URL: <http://www.deltronics.ru/product/servo/> (data obrashhenija: 20.11.2016).
15. Privodnaja jelektronika «SEW-EURODRIVE» [Jelektronnyj resurs]. URL: <http://www.sew-eurodrive.ru/catalog/2/10.html> (data obrashhenija: 20.11.2016).