

## Электротехника

УДК 681.3.06

### ПОЗИЦИОННАЯ СИСТЕМА ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ПРОГРАММНОЙ КОРРЕКЦИЕЙ

*В.А. Денисов, Р.Р. Мадьшев, О.А. Бородин*

Тольяттинский государственный университет  
Россия, 445667, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14

*Рассмотрены принцип построения, структура и синтез параметров позиционной системы электропривода с программной коррекцией, обеспечивающей высокое быстродействие при обработке заданного перемещения. Структура позиционной системы создана на основе вентильного двигателя и микропроцессорного модуля, обеспечивающего работу программной коррекции в реальном масштабе времени путем переключения обратных связей в функции изменения выходной координаты. Дан сравнительный анализ работы системы с программной коррекцией с системами, содержащими линейный и оптимальный регуляторы. Для получения максимального быстродействия параметры линейного регулятора оптимизированы полиномом Баттерворта, а параметры оптимального регулятора определены на основе принципа максимума, когда обработка заданного перемещения производится в два интервала при максимально допустимом моменте на валу вентильного двигателя.*

**Ключевые слова:** позиционная система с программной коррекцией, системы электропривода с переменной структурой.

Исследованию максимального быстродействия позиционного электропривода посвящено значительное количество работ [1, 3, 5]. Следует отметить, что проблема максимального быстродействия решена в теории оптимального управления для систем, в которых приведенный к валу двигателя момент инерции и момент сопротивления предполагаются известными и постоянными. Однако большого практического применения такие системы не получили, что связано с отсутствием грубости получаемой системы управления к изменяющимся параметрам системы и нагрузки, которые в общем случае не являются постоянными величинами, а могут изменяться по достаточно сложным законам. Использование в алгоритме оптимального управления аналитического выражения поверхности переключения приводит к тому, что получаемая система управления является практически нереализуемой. Это объясняется тем, что аналитические выражения, описывающие поверхность переключения, получаются чрезвычайно сложными и алгоритмы, созданные на их основе, реализовать даже на современных быстродействующих микроконтроллерах не является простой задачей. В некоторых работах предлагается аппроксимировать сложные аналитические выражения

---

*Владимир Андреевич Денисов, доцент.  
Рамиль Равилович Мадьшев, аспирант.  
Олег Александрович Бородин, инженер.*

удобными для технической реализации функциями. Однако и в этом случае проблема решения задачи оптимального управления остается.

Одним из путей, который позволяет решить задачу повышения быстродействия позиционных систем электропривода, является квазиоптимальный принцип, когда в канал управления позиционным электроприводом включается блок программной коррекции (БПК). Названная коррекция осуществляется программным изменением коэффициента обратной связи по скорости изменения выходной координаты, что позволяет формировать переходный процесс в системе за счет исключения в форсирующем сигнале переменной величины, пропорциональной ошибке регулирования [3, 4].

Позиционная система электропривода с БПК приведена на рис. 1. Объект управления позиционной системы представлен передаточной функцией вида

$$x(p) = \frac{K_0}{p(\tau p + 1)} u_y(p), \quad (1)$$

где  $x$  – координата перемещения объекта;

$u_y$  – сигнал управления;

$\tau$  и  $K_0$  – соответственно постоянная времени и коэффициент передачи объекта.

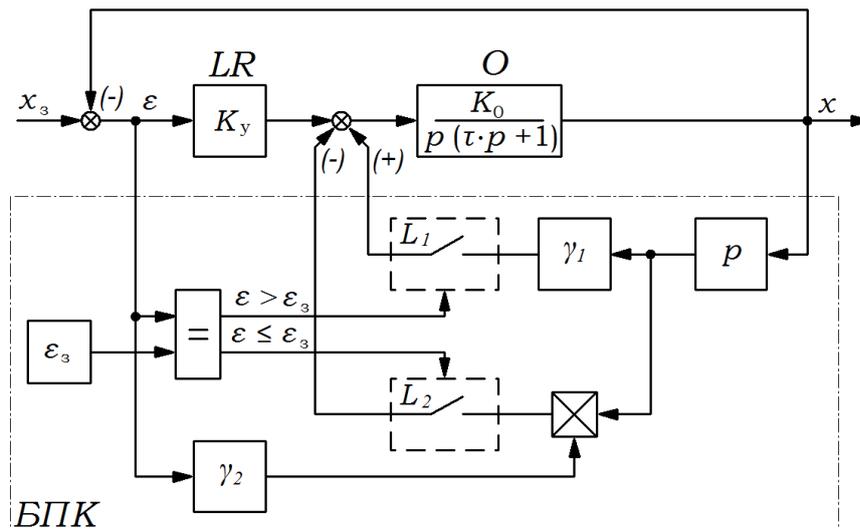


Рис. 1. Система электропривода с блоком программной коррекции (БПК)

Алгоритм позиционной системы с нелинейной коррекцией работает в реальном масштабе времени и обеспечивает отработку заданного перемещения в две фазы. В начальной фазе ошибка перемещения  $\varepsilon = (x_3 - x)$  превышает заданную ошибку  $\varepsilon_3$ , и в контур регулирования положения объекта через условный ключ  $L_1$  вводится положительный сигнал по скорости  $px(p)$  перемещения с критическим коэффициентом  $\gamma_1$ . В результате замкнутая система переходит на границу устойчивости и движение объекта происходит с предельным ускорением.

Как только ошибка рассогласования достигнет расчетной величины, т. е.  $\varepsilon \leq \varepsilon_3$ , в действие вступает алгоритм второй фазы. В контур регулирования вме-

сто положительной обратной связи через условный ключ  $L_2$  вводится отрицательная обратная связь по скорости перемещения с программируемым коэффициентом передачи  $\gamma_2$ , что позволяет обеспечить эффективное торможение объекта и сформировать монотонный переходный процесс требуемого качества.

Найдем уравнение движения системы при действии главной отрицательной обратной связи и сигналов обратной связи, замыкаемых через условные ключи:

$$u_y(p) = K_y \varepsilon(p) \pm \gamma p X(p) = K_y X_3(p) - K_y X(p) \pm \gamma p X(p), \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  – величина рассогласования;  $\gamma$  – коэффициент положительной или отрицательной обратной связи. Подставляя выражение (2) в уравнение (1), получаем уравнение движения замкнутой системы.

$$p^2 X(p) + \frac{1}{\tau} (1 \pm K_0 \gamma) p \cdot X(p) + \omega_0^2 X(p) = \omega_0^2 X_3(p), \quad (3)$$

где  $\omega_0 = \sqrt{K_y K_0 \tau^{-1}}$  – собственная круговая частота системы регулирования;

$K_y$  – коэффициент усиления регулятора системы.

На границе устойчивости уравнение движения (3) вырождается в уравнение консервативного звена

$$p^2 X(p) + \omega_0^2 X(p) = \omega_0^2 X_3(p). \quad (4)$$

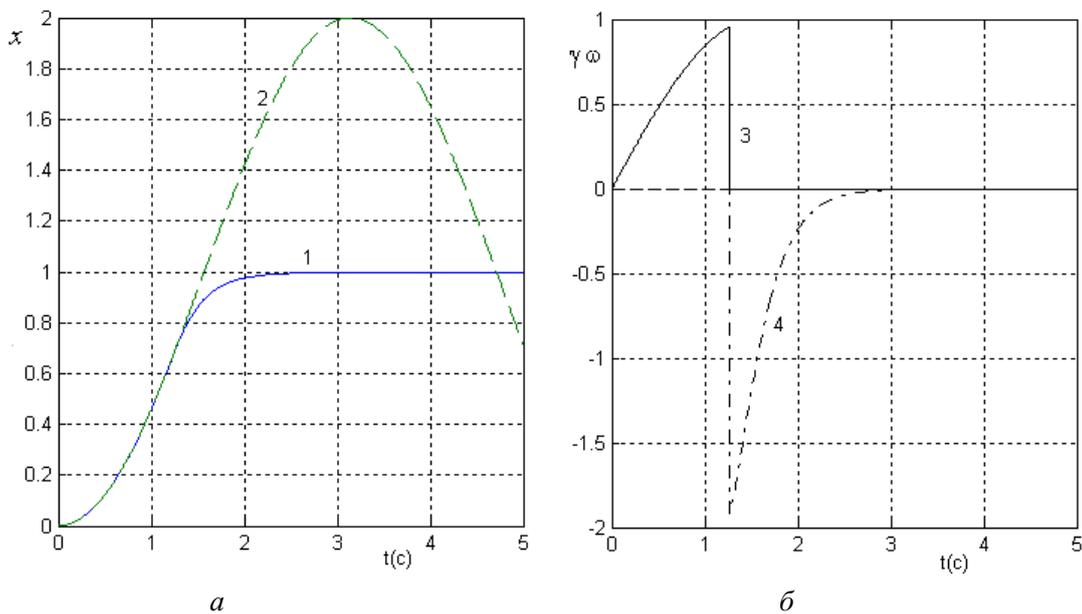


Рис. 2. Переходные характеристики (а) и сигналы тахометрической обратной связи (б)

Из сравнения уравнений (3) и (4) получаем  $\gamma_1 = 1/K_0$ , так как  $1 - K_0 \gamma = 0$ . При выполнении условия  $\varepsilon \leq \varepsilon_3$  уравнение движения системы электропривода принимает вид

$$p^2 X(p) + \frac{1}{\tau} (1 + K_0 \gamma_2(\varepsilon)) p \cdot X(p) + \omega_0^2 X(p) = \omega_0^2 X_3(p). \quad (5)$$

Переходная характеристика позиционной системы с программной коррекцией приведена на рис. 2а (кривая 1). Начальный участок характеристики совпадает с кривой 2, которая соответствует характеристике консервативного звена, т. е. движению на границе устойчивости системы.

Положительная тахометрическая обратная связь в системе действует, когда величина рассогласования  $\varepsilon > \varepsilon_3$ . В процессе ускоренного движения электропривода величина рассогласования  $\varepsilon$  уменьшается, и когда  $\varepsilon < \varepsilon_3$ , положительная обратная связь отключается. В действие вступает отрицательная обратная связь, что приводит к эффективному замедлению. Действие отрицательной обратной связи заканчивается, когда модуль величины рассогласования будет равен нулю.

Кривые, раскрывающие принцип действия положительной и отрицательной тахометрических обратных связей, изображены на рис. 2б. Здесь положительная обратная связь представлена кривой 3, отрицательная обратная связь – кривой 4.

Для проведения сравнительного анализа рассмотрены движение системы электропривода с программной коррекцией и движение системы электропривода с линейным регулятором. При этом параметры линейного регулятора оптимизированы полиномом Баттерворта, чтобы получить минимальное время переходного процесса [4].

Уравнение движения замкнутой позиционной системы с применением полинома Баттерворта

$$(p^2 + 1,41p\omega_0 p + 1)X(p) = \omega_0^2 X_3(p). \quad (6)$$

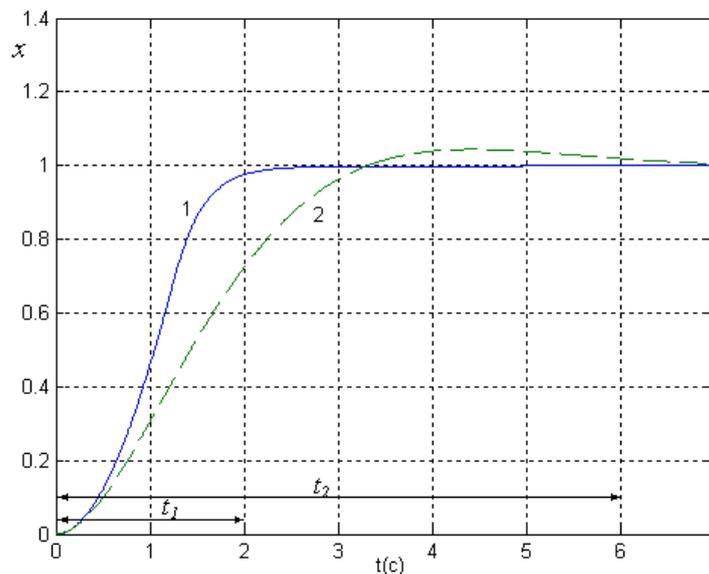


Рис. 3. Переходные характеристики системы электропривода с БПК (1) и системы электропривода с линейным регулятором Баттерворта (2)

Из сравнения приведенных характеристик (рис. 3) следует, что длительность переходного процесса системы с программой коррекцией составляет 2 с, тогда как для системы с линейным регулятором она равна 6 с. Таким образом, применение структуры регулирования с программной коррекцией позволяет повысить быстродействие системы в три раза при отсутствии перерегулирования.

Для оценки возможности применения программной коррекции в быстродействующем электроприводе произведем сравнительный анализ работы позиционной системы с блоком программной коррекцией (БПК) и системы электропривода с оптимальным OR регулятором.

Силовая часть сравниваемых позиционных систем (рис. 4) содержит вентильный двигатель М, выполненный на базе синхронной машины с возбуждением от редкоземельных постоянных магнитов с управлением транзисторных ключей инвертора от датчика углового положения ротора. Вал ротора двигателя соединен с понижающим RM редуктором, который представлен в структурной схеме интегрирующим звеном.

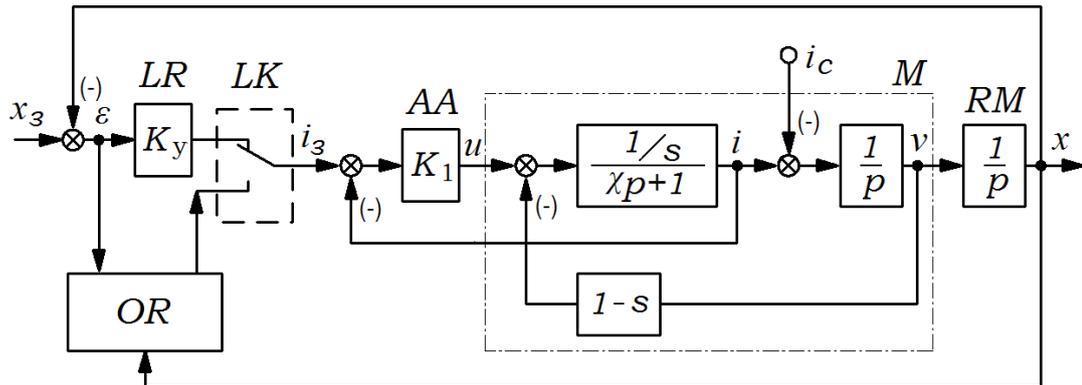


Рис. 4. Позиционная система электропривода с оптимальным регулятором

При математическом описании уравнения вентильного двигателя [3] запишем в относительных единицах

$$\left\{ \begin{array}{l} i = \frac{1}{(\chi p + 1)} [u - (1 - s)v]; \\ v = \frac{1}{p} (\mu - \mu_c); \\ x = \frac{1}{p} v, \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (7) \\ (8) \\ (9) \end{array}$$

где  $i = i_{sq} / I_n$  – относительная величина тока двигателя;  
 $u = u_{sq} / U_n$  – относительная величина напряжения статора;  
 $v = \omega / \omega_n$  – относительная величина угловой скорости;  
 $x = x_1 / x_3$  – относительная величина углового перемещения вала двигателя;  
 $I_n, U_n, \omega_n$  – соответственно номинальные значения тока, напряжения и скорости двигателя;  
 $s = (\omega_0 - \omega_n) / \omega_0 = r_a I_n / c_e \omega_0$  – скольжение;  
 $\omega_0$  – угловая скорость холостого хода;  
 $r_a$  – эквивалентное активное сопротивление статора;  
 $c_e = U_n / \omega_0, c_m = M_n / I_n$  – конструктивные коэффициенты двигателя;

$\mu = M / M_n$  – относительная величина вращающего момента двигателя;  
 $\mu_c = M_c / M_n$  – относительная величина момента статической нагрузки;  
 $M_n, M_c$  – соответственно номинальные значения момента двигателя, перемещения и момента нагрузки;  
 $T_m = J_\Sigma \cdot \omega_n / M_n$  – механическая постоянная времени двигателя;  
 $J_\Sigma$  – приведенный к валу двигателя момент инерции;  
 $\chi^* = T_a / T_m$  – относительная (безразмерная) постоянная времени;  
 $T_a$  – электромагнитная постоянная времени двигателя;  
 $p = d / d\tau$  – оператор дифференцирования;  
 $\tau = t / T_m$  – относительное (безразмерное) время.

При использовании относительных единиц электромагнитный момент двигателя равен току якоря, т.е.  $\mu = i$ .

Введение в схему регулирования жесткой отрицательной обратной связи по току позволяет получить практически безынерционное протекание электромагнитных процессов в статорной цепи двигателя. Учитывая, что  $K_I \gg 1$ , уравнение (7) для тока принимает вид

$$i = i_3 - (1-s) / K_I v, \quad (10)$$

где  $i_3$  – заданное значение тока;

$K_I$  – общий коэффициент передачи блока АА, включающий широтно-импульсный преобразователь и регулятор тока.

Для описания движения замкнутой позиционной системы требуется к приведенным уравнениям добавить уравнение ошибки  $\varepsilon$  (отклонения)

$$\varepsilon = x_3 - x. \quad (11)$$

Расчет параметров оптимального регулятора производится из условия обеспечения отработки заданного перемещения  $x_3$  за наименьшее время при действии на валу момента нагрузки  $M_c = const$  [2, 5]. На управление наложено ограничение по току:  $-i_{\max} < i < i_{\max}$ , где  $i_{\max}$  – величина ограничения.

Оптимальное управление может быть представлено в виде

$$i = \begin{cases} i_{\max}, & \text{если } 1 \geq \varepsilon \geq \varepsilon_n; \\ -i_{\max}, & \text{если } \varepsilon_n > \varepsilon \geq 0, \end{cases} \quad (12)$$

где  $\varepsilon_n$  – ошибка в момент переключения.

Для реализации оптимального управления необходимо в начальный момент времени, когда  $\varepsilon = 1$ , создать на валу двигателя максимально допустимый момент, ток  $i_{\max}$ . Затем при достижении ошибки  $\varepsilon = \varepsilon_n$  создать на валу двигателя максимально допустимый момент обратного знака ( $-i_{\max}$ ) и после окончания переходного процесса осуществить переключение в режим работы с линейным регулятором положения.

Результаты моделирования переходных процессов в рассматриваемых системах представлены на рис. 5. Осциллограммы работы системы с оптимальным регулятором (ОР) показаны штриховой линией (1), а системы с блоком (БПК) программной коррекции показаны сплошной линией (2). Отработка заданного перемещения системы с ОР осуществляется в два интервала, т. е. за одно пере-

ключение. График изменения скорости вращения имеет характерный треугольный вид, а изменение тока приближено к прямоугольному виду (рис. 5в). Осциллограммы изменения скорости и тока в системе с БПК изменяются медленнее, причем момент переключения обратной связи происходит позднее. В результате этого отработка перемещения в позиционной системе с БПК происходит на 7 % с большим временем. Оба процесса протекают монотонно без перерегулирования.

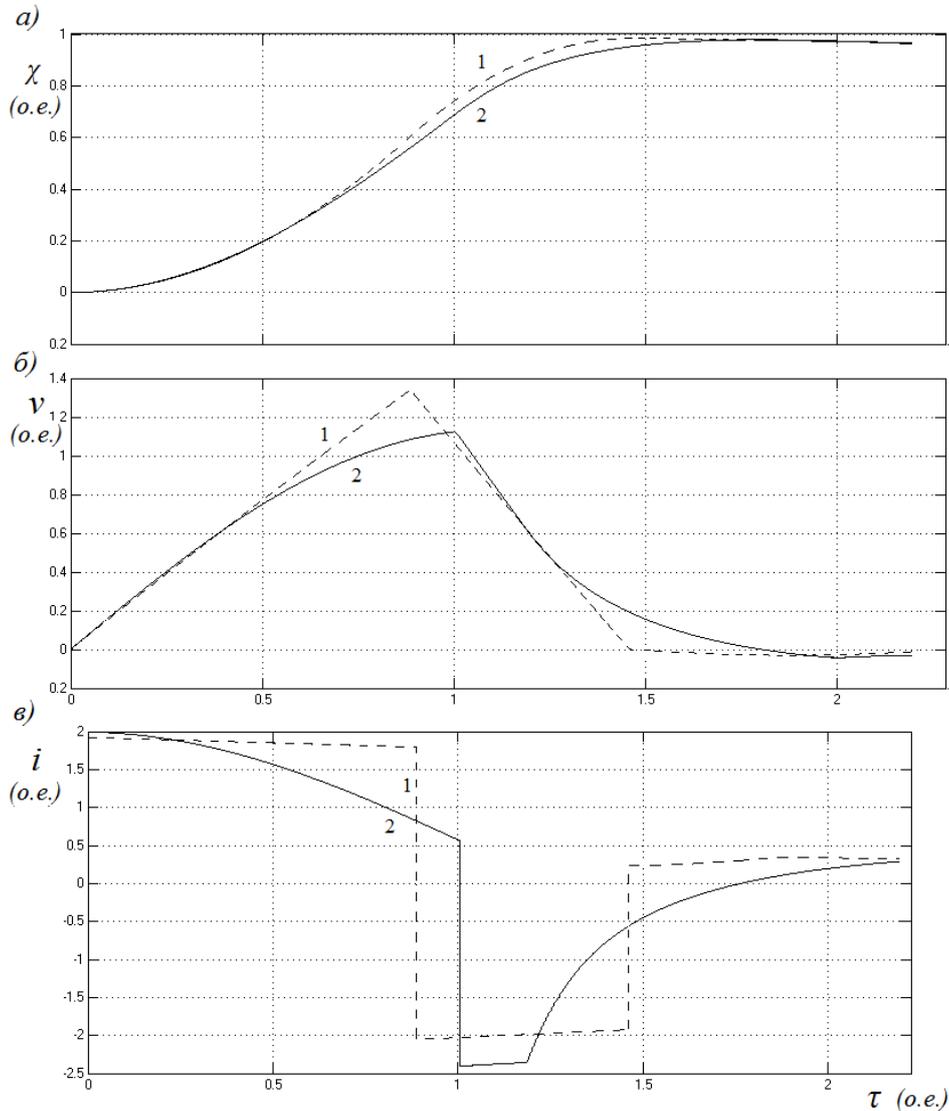


Рис. 5. Осциллограммы работы систем с оптимальным регулятором (ОР) и системы с блоком (БПК) программной коррекции

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

- позиционная система с БПК относится к квазиоптимальным системам, она способна обеспечить высокое быстродействие отработки заданных перемещений при сравнительно простой структуре системы управления;
- высокое быстродействие переходного процесса при отсутствии перерегулирования обеспечивается в позиционной системе действием БПК, работающим

не во времени, а через текущие значения координат и независимо от того, в какой момент времени они имеют место в процессе обработки перемещения.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Александров А.Г. Оптимальные и адаптивные системы. – М.: Высшая школа, 1989. – 264 с.
2. Денисов В.А. Системы позиционного электропривода с переменной структурой управления. – М.: Спутник+, 2013. – 122 с.
3. Денисов В.А. Синтез системы электропривода с переменной структурой // Электромеханика, электротехнологии, электротехн. компоненты: тр. XI Международ. конф. ЭЭЭ. – М.: МЭИ (ТУ), 2006. – Ч. 2. – С. 180–182.
4. Методы классической и современной теории автоматического управления. Т. 3: Синтез регуляторов систем автоматического управления / Под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егунова. – М.: МГТУ им. Баумана, 2004. – 616 с.
5. Теория автоматического управления / Под ред. А.А. Воронова. – М.: Высшая школа, 1986. – Ч. 1 – 368 с.; Ч. 2 – 504 с.

*Статья поступила в редакцию 23 апреля 2014 г.*

## POSITIONAL ELECTRIC DRIVE SYSTEM WITH PROGRAMMATIC CORRECTION

***V.A. Denisov, R.E. Madyshev, O.A. Borodin***

Togliatti State University  
146 st. Belarus, Togliatti, 445667, Russian Federation

*The principles of design, structure and synthesis of positional parameters of the electric drive system with software correction, providing high performance by working out at given movement are considered. Structure positioning system is made on the basis of valve engine and microprocessor module providing work of software correction in real time by switching feedbacks in the function of changing the output coordinate. A comparative analysis of systems with software correction with systems containing linear and optimal regulators is given. To obtain maximum performance parameters of the linear regulator optimized by polynomial Butterworth, and the parameters of the optimal regulator are determined on the basis of the maximum principle when working out of a given movement is made in two intervals at the highest possible torque on a valve engine shaft.*

***Keywords:*** *positioning electric drive system with programmatic correction, electric drive system with variable structure.*

---

*Vladimir A. Denisov (Ph.D.(Techn)), Associate Professor.  
Ramil R. Madyshev, Postgraduate student.  
Oleg A. Borodin, Engineer.*