

**ИНФОРМАТИКА**

УДК 621.01

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ  
ПЛАНАРНЫМ ПРИВОДОМ ПРЯМОГО ДЕЙСТВИЯ**

А.А. АГРАНОВИЧ, В.В. ЖАРСКИЙ, В.П. ОГЕР, С.М. АВАКОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь**Поступила в редакцию 7 сентября 2006*

Предложены математическая и компьютерная модели планарного привода на базе линейных шаговых двигателей, основанные на физической модели привода. Предложенные модели учитывают основные нелинейности характеристик материалов, из которых изготовлен привод. Проведено компьютерное моделирование системы управления планарным приводом.

*Ключевые слова:* система управления, компьютерное моделирование, линейный шаговый двигатель.

**Введение**

Для реализации цифрового замкнутого управления приводом прямого действия необходимо полное понимание его динамики. Как известно, составление адекватной математической модели двигателя позволяет в дальнейшем оценить динамику мотора. С помощью программ компьютерного моделирования такие модели могут быть протестированы, а их результаты сравниваются с измерениями реального объекта для того, чтобы оценить их точность и адекватность.

Простая модель двигателя, основанная на характеристике [1]:

$$F_{\Sigma} = \frac{2\pi R_0 k_g}{\tau} \Phi_{pm} \Phi_c \sin\left(\omega t - \frac{2\pi x}{\tau}\right), \quad (1)$$

дает довольно точные ответы о динамике двигателя, однако такая математическая модель адекватна в пределах малого угла упреждения; в этом случае характеристика (1) сохраняется близкой к линейной, однако для работы двигателя на высоких скоростях и ускорениях необходимо поддерживать высокий угол упреждения (около 90°). Кроме того, поскольку одним из методов управления является управление углом упреждения, линеаризованная характеристика в окрестности другой рабочей точки на нелинейном участке будет иметь другой наклон. С учетом вышесказанного следует, что для компьютерного моделирования далеко не всегда в качестве математической модели можно использовать выражение (1).

**Основные уравнения**

Уравнения, описывающие физические свойства линейного шагового двигателя, приведены отдельно для трех основных моделей: *электрической, магнитной и механической*. Такой подход построения математической модели ЛШД подразумевает объединение

дифференциальных уравнений в систему для дальнейшего ее использования в компьютерном моделировании.

В векторной форме уравнения, описывающие динамику привода, будут иметь вид

$$\begin{aligned}\dot{\vec{x}} &= \vec{f}(\vec{x}, \vec{u}, t), \\ \dot{\vec{y}} &= \vec{g}(\vec{x}, \vec{u}, t).\end{aligned}\quad (2)$$

Определим вид уравнений состояния системы. Анализируя уравнения, описывающие физические процессы, происходящие в приводе [2], можно записать:

$$\begin{aligned}\dot{\Phi}_{23} &= \frac{u_A}{n} + \frac{R_1 R_3 + R_2 R_4}{(R_1 + R_4)(R_2 + R_3) + (R_1 + R_2 + R_3 + R_4)(R_{pl.A} + R_{pm})} \frac{R_{dw} M_{pm}}{n^2} - \\ &\quad - \frac{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)(R_{12} + R_{34} + R_{pl.A} + R_{pm})}{(R_1 + R_4)(R_2 + R_3) + (R_1 + R_2 + R_3 + R_4)(R_{pl.A} + R_{pm})} \frac{R_{dw} \Phi_{23}}{n^2},\end{aligned}\quad (3)$$

$$\begin{aligned}\dot{\Phi}_{67} &= \frac{u_B}{n} + \frac{R_5 R_7 + R_6 R_8}{(R_5 + R_8)(R_6 + R_7) + (R_5 + R_6 + R_7 + R_8)(R_{pl.B} + R_{pm})} \frac{R_{dw} M_{pm}}{n^2} - \\ &\quad - \frac{(R_5 + R_6)(R_7 + R_8)(R_{56} + R_{78} + R_{pl.B} + R_{pm})}{(R_5 + R_8)(R_6 + R_7) + (R_5 + R_6 + R_7 + R_8)(R_{pl.B} + R_{pm})} \frac{R_{dw} \Phi_{67}}{n^2},\end{aligned}\quad (4)$$

$$F - F_d - m \ddot{x} = 0. \quad (5)$$

Эти уравнения связаны исходными выражениями, т.е.  $F$  представляется как функция  $\Phi_{23}$ ,  $\Phi_{67}$ ,  $\Phi_{pm.A}$  и  $\Phi_{pm.B}$ , которые в свою очередь являются функциями  $\Phi_i$ .

Введем отдельную переменную для скорости двигателя:

$$v \equiv \dot{x}. \quad (6)$$

Тогда

$$\dot{v} = \frac{F - F_d}{m}. \quad (7)$$

В результате получим функции для описания линейного шагового двигателя системой дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\begin{aligned}\dot{\Phi}_{23} &= f_1(\Phi_{23}, R_i(x, \Phi_i(i_A(\Phi_{23}, R_j(\dots)), R_k(\dots))), i_A, t) = \tilde{f}_1(\Phi_{23}, x, i_A, t) \\ \dot{\Phi}_{67} &= f_1(\Phi_{67}, R_i(x, \Phi_i(i_B(\Phi_{67}, R_j(\dots)), R_k(\dots))), i_B, t) = \tilde{f}_1(\Phi_{67}, x, i_B, t) \\ \dot{v} &= f_3(F(\Phi_{23}, \Phi_{67}, \Phi_{pm.A}(\Phi_i(i_A(\Phi_{23}, R_j(x, \Phi_j(\dots))), R_k(\dots))), \\ &\quad \Phi_{pm.B}(\Phi_i(i_B(\Phi_{67}, R_j(x, \Phi_j(\dots))), R_k(\dots))), F_d(v), t) = \tilde{f}_3(\Phi_{23}, \Phi_{67}, x, t), \\ \dot{x} &= v = \tilde{f}_4(v, t).\end{aligned}\quad (8)$$

Из этих уравнений можно увидеть, что  $\Phi_{23}$ ,  $\Phi_{67}$ ,  $x$  и  $v$  являются переменными состояниями линейного шагового двигателя. Используя эти переменные состояния, можно произвести компьютерное моделирование с тем предположением, что начальные условия системы известны. Входами системы являются токи, подаваемые на двигатель с усилителя  $i_A$  и  $i_B$ . Какими выходами необходимо управлять, зависит от поставленной задачи. В рассматриваемом случае выходными переменными являются  $x$ ,  $v$ , и  $F$ . Чтобы решение (8) было единственным, необходимо знать значения переменных состояния в начальный момент времени. Примем, что питание было включено давно, так что все переходные процессы уже завершились. Значения токов будут соответственно равны  $i_A=0$  и  $i_B=i_{max}$ .

При проведении компьютерного моделирования будет использовано компьютерное численное решение для определения переменных состояния как функций времени.

### Структурная блок-схема системы управления линейным шаговым двигателем

Система управления линейным шаговым двигателем состоит из логически законченных подсистем, объединенных в одну систему. Такой подход представления модели является наиболее удобным, так как позволяет создать описание динамики ЛШД в логически связанном виде. Структурная блок-схема системы управления, воспроизведенная в MATLAB/Simulink, представлена на рис. 1.

Как видно из структурной схемы, система управления планарным приводом состоит из основных модулей: *интерполятора, индексатора, блока управления, усилителей и двигателя.*

*Интерполятор или генератор скорости.* Для того чтобы эффективно управлять двигателем, необходимо иметь задатчик управляющих воздействий. Интерполятор представляет собой программную реализацию заданной скорости перемещения позиционера, т.е. в каждый момент времени на выходе интерполятора заданная скорость, с которой должен перемещаться двигатель.

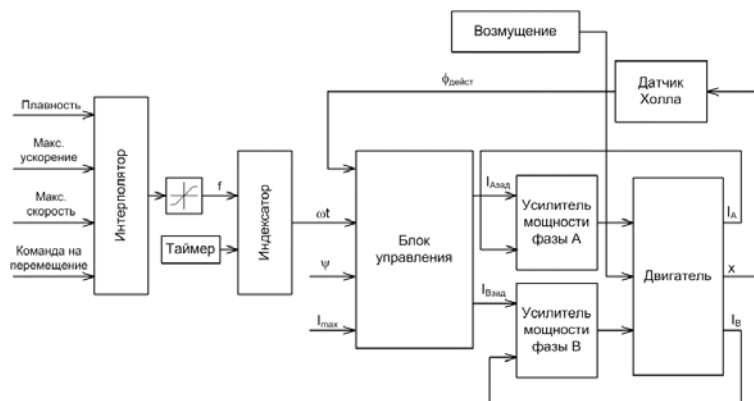


Рис. 1. Структурная блок-схема системы управления

Используемый в системе управления приводом PF-211.HS интерполятор реализует перемещение с постоянным ускорением. До начала перемещения задаются параметры перемещения — скорость, на которую следует выйти после разгона, и ускорение, которое должно быть приложено на этапах разгона-торможения. Далее при поступлении команды перемещения интерполятор формирует последовательность требуемых (заданных) скоростей

по координате (координатам) таким образом, чтобы в результате привод оказался в конечной позиции, перемещаясь на этапе разгона-торможения с постоянным (прикладываемым скачкообразно) ускорением.

*Индексатор* определяет заданное положение по входному сигналу скорости. Значение выхода индексатора имеет вид фазового угла  $\varphi$ ; значение угла  $\varphi$ , равное  $360^\circ = 2\pi$ , соответствует одному шагу перемещения линейного шагового двигателя. Для значения функции  $\varphi(t)$  имеем выражение (9).

$$\varphi(t_{i+1}) = \varphi(t_i) + 2\pi f \Delta t, \quad \Delta t = t_{i+1} - t_i. \quad (9)$$

В выражении (9) изменение  $f$  ограничивается малой величиной  $\Delta t$ . Реализация закона (9) представлена на рис. 2.

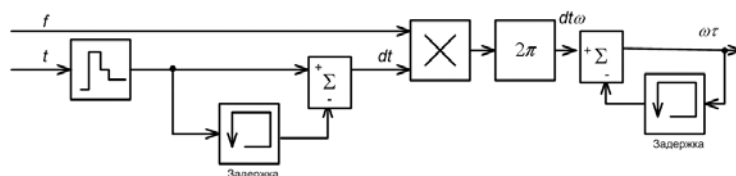


Рис. 2 Структурная блок-схема индексатора

*Блок управления* предназначен для преобразования сигналов управления в токовые команды. Структурная схема блока управления представлена на рис. 3.

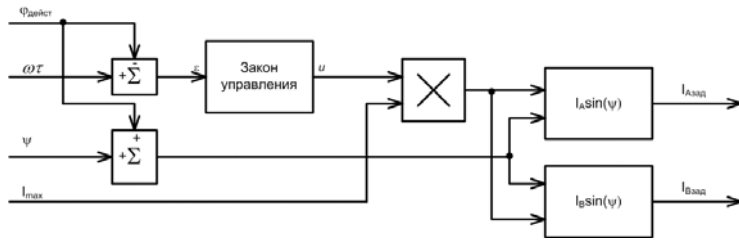


Рис. 3. Структурная блок-схема блока управления

Следует обратить внимание на блок "Закон управления", который предназначен для преобразования сигнала ошибки в сигнал управления.

Усилитель представляет собой блок, преобразующий токовую команду в электрический ток, подаваемый на катушки. Усилитель мощности включает

аппаратный стабилизатор тока, позволяющий обеспечивать необходимое значение тока. В большинстве случаев под математической моделью усилителя подразумевается подсистема "усилитель–катушка", однако в данном случае целесообразно разделить эти две системы, так как математическая модель линейного шагового двигателя, описанная выше, учитывает физические процессы, происходящие в моторе.

*Двигатель.* Одной из наиболее сложных моделей системы управления является математическая модель линейного шагового двигателя. В большинстве случаев, пренебрегая насыщением магнитной цепи, потерями в сердечнике, при замыкании мотора по положению считают, что двигатель можно представить моделью двигателя постоянного тока. В отдельных случаях такой подход приемлем, однако если возникает вопрос о предельной динамике линейного шагового двигателя, а также о применении разрывных законов управления, математическую модель мотора нужно уточнять.

### Результаты компьютерного моделирования с ПИД- регулятором

Компьютерное моделирование систем управления ставит перед собой целью отыскание оптимального закона регулирования, определение алгоритмов и методов управления, доставляющих системе управления более высокие характеристики качества регулирования и обоснование таких структур посредством проведения компьютерного исследования и анализа полученных результатов.

Для исследования качества регулирования исследуем реакцию системы на ступенчатое воздействие. Проведем несколько опытов реакции системы на скачок. Переходный процесс системы при величине скачка в 10 мкм и параметрах регулятора  $K_{pr}=40$ ;  $K_{int}=0,001$ ;  $K_{dif}=0,02$  приведен на рис. 4.

Как видно по результатам моделирования, система управления планарным приводом на линейных шаговых двигателях представляет собой апериодическое звено второго порядка при малых сигналах, скорости и ускорении.

Для наиболее ответственных контуров систем управления рекомендуется использование ПИД-регулятора, обеспечивающего наиболее высокое быстродействие в системе.

ПИД-регулятор следует выбирать для систем регулирования с относительно малым уровнем шумов и величиной запаздывания в объекте управления. Однако следует учитывать, что ПИД-регулятор обеспечивает высокие характеристики системы управления только при его оптимальных настройках (настраиваются три параметра). С увеличением запаздывания в системе резко возрастают отрицательные фазовые сдвиги, что снижает эффект действия дифференциальной составляющей регулятора. Поэтому качество работы ПИД-регулятора для систем с большим запаздыванием становится сравнимо с качеством работы ПИ-регулятора. Кроме этого, наличие шумов в канале измерения в системе с ПИД-регулятором приводит к значительным случайным колебаниям управляющего сигнала регулятора, что увеличивает дисперсию ошибки регулирования.

Использование полученной модели, адекватность которой определялась с помощью ARX и PEM методов, для компьютерного моделирования, позволило определить оптимальные параметры ПИД-регулятора ( $K_{pr}=40$ ;  $K_{int}=0,001$ ;  $K_{dif}=0,02$ ).

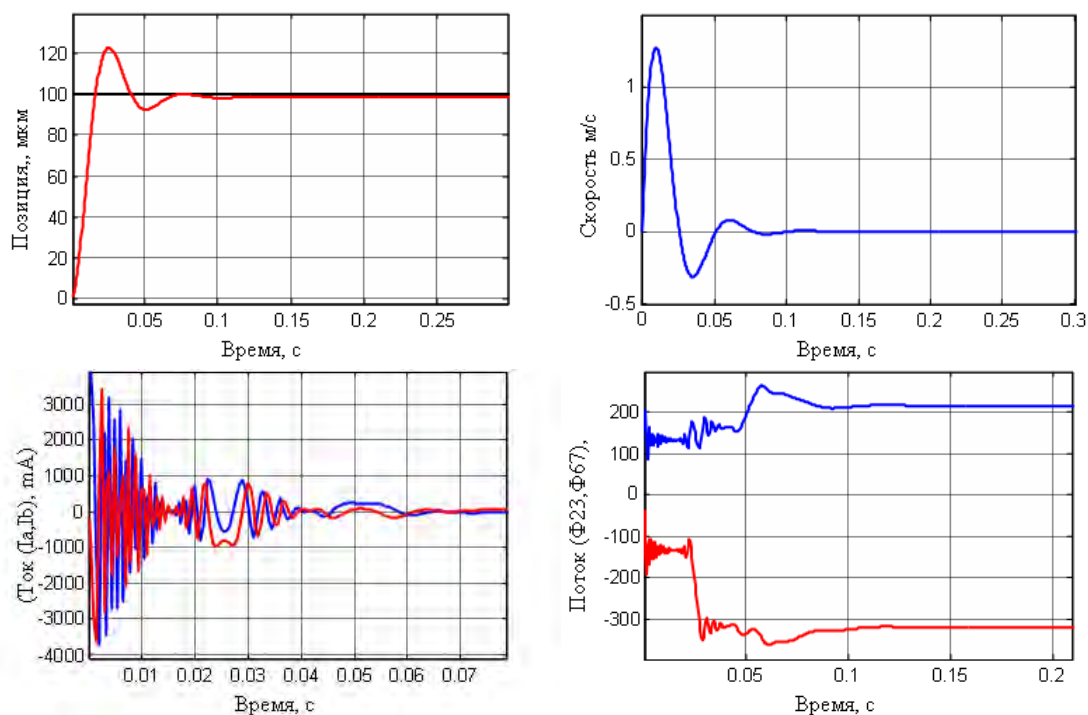


Рис. 4. Переходный процесс системы при параметрах ПИД-регулятора:  $K_{pr}=40$ ;  $K_{int}=0,001$ ;  $K_{dif}=0,02$ ;  $\Psi=90^\circ$

### Заключение

1. На основании обобщенной математической модели в среде MATLAB/Simulink предложена компьютерная модель планарного привода.
2. Компьютерная модель позволяет моделировать динамику планарного привода прямого действия при различных алгоритмах регулирования и различных начальных условиях.
3. В результате компьютерного эксперимента получены оптимальные параметры ПИД-регулятора для планарного привода.

## DIRECT DRIVE CONTROL SYSTEM COMPUTER SIMULATION

A.A. AHRANOVICH, V.V. ZHARSKY, V.P. OHER, S.M. AVAKOW

### Abstract

Mathematical and computer model of planar drive based on linear stepper motors were discussed. The models are based on physical model and take into account the basic non-linearity of drive materials. Computer simulation of control systems was carried out for models proposed.

### Литература

1. Schulze-Lauen H. Development of an Enhanced Linear Motor Drive for a High Speed Flexible Automation System. Massachusetts Institute of Technology, 1993. P. 225.
2. Follinger O. Regelungstechnik, Einführung in die Methoden und ihre Anwendung. Heidelberg, Huthig, 1992.
3. [http://www.compitech.ru/html.cgi/arhiv/03\\_05/stat\\_114.htm](http://www.compitech.ru/html.cgi/arhiv/03_05/stat_114.htm)
4. van der Heijden F., Duin R.P.W., de Ridder D., Tax D.M.J. Classification, Parameter Estimation and State Estimation: An Engineering Approach using MATLAB. Prentice Hall. 2005.
5. Yucai Zhu. Multivariable System Identification: for Process Control. Pergamon Press. 2001.