

УДК 621.34

**Ю.В. Губарь** (канд. техн. наук, доц.)

Донецкий национальный технический университет

[gubar@cs.dgtu.donetsk.ua](mailto:gubar@cs.dgtu.donetsk.ua)

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЦИФРОАНАЛОГОВОЙ СИСТЕМЫ ПОЗИЦИОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С КОМБИНИРОВАННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Методом математического моделирования в среде Matlab + Simulink выполнено исследование переходных процессов в системе регулирования положения (СРП) с комбинированным управлением по задающему воздействию от влияния квантования по времени и временного запаздывания, вызванного работой цифровой части системы. Показано, что за счет рационального выбора параметров СРП из условий модульного оптимума, удастся скомпенсировать негативное влияние эффектов квантования по времени и временного запаздывания и улучшить динамические показатели системы

**Ключевые слова:** позиционный электропривод, моделирование, пространство состояний, переходной процесс, квантование по времени.

### ***Введение***

Одной из важнейших является проблема дальнейшего совершенствования оборудования и технологий производства. Решение этой проблемы невозможно без создания автоматизированных электроприводов с высокими динамическими и энергетическими характеристиками, что отмечалось в постановлениях международных и украинских конференций по электроприводу [1].

В работе рассматриваются цифроаналоговые системы позиционного электропривода постоянного тока, работающие по заданной программе с ограниченными величинами ускорения и скорости. По сравнению с соответствующими аналоговыми системами позиционного электропривода цифроаналоговые обладают большей точностью позиционирования и надежности, высокой помехоустойчивостью и т. д. [2]. При этом облегчается создание иерархических комплексов управления электроприводами за счет использования стандартных узлов сопряжения между нижним уровнем управления электроприводами и вышестоящими комплексами.

Целью работы является исследование динамических характеристик имитационной модели цифроаналоговой комбинированной системы регулирования положения от эффектов квантования по времени и временного запаздывания. В качестве инструментального средства визуального моделирования динамических систем выбрана система

Simulink, входящая в состав популярного математического пакета Matlab [3].

### Описание цифроаналоговой системы регулирования положения с комбинированным управлением

Структурная схема цифроаналоговой СРП с комбинированным управлением по задающему воздействию приведена на рис.1. Система выполнена по принципу подчиненного регулирования [2] и включает два аналоговых регулятора: тока (РТ) и скорости (РС), а также цифровой регулятор положения (РП). Цифровой задатчик положения (ЦЗП) на основе заданного угла поворота вала двигателя  $\varphi_3^*$  формирует сигнал желаемого закона изменения угла поворота вала двигателя (Д)  $\varphi_{ж}^*$  и корректирующие сигналы  $k_1 \cdot \omega_{ж}^*$  и  $k_2 \cdot \varepsilon_{ж}^*$ , пропорциональные желаемым законам изменения скорости  $\omega_{ж}^*$  и ускорения  $\varepsilon_{ж}^*$  (в качестве желаемых приняты технически оптимальные законы управления [2]). Сумма этих сигналов представляет управляющее воздействие  $g^*$ , которое поступает на вход РП. Последний осуществляет линейный алгоритм преобразования. Звездочкой на схеме обозначены коды соответствующих сигналов.

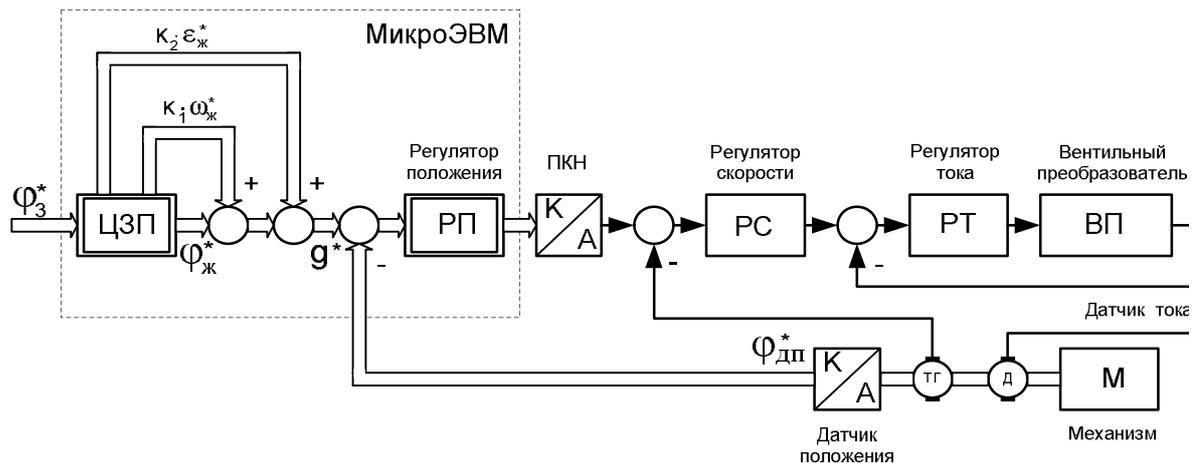


Рисунок 1 - Структурная схема цифроаналоговой СРП с комбинированным управлением

Согласование цифрового РП с аналоговым контуром регулирования скорости (КРС) осуществляет преобразователь код –

напряжение (ПКН), одновременно выполняющего функции экстраполятора нулевого порядка (ЭНП) с фиксацией на период квантования по времени  $T$ . В качестве датчика скорости применен тахогенератор (ТГ). Двигатель постоянного тока Д питается от управляемого вентильного преобразователя (ВП). Кодовый датчик положения, установленный на валу двигателя, формирует код сигнала  $\varphi_{дп}^*$ , соответствующий текущему углу поворота (угловому перемещению).

Функции ЦЗП и ЦРП могут быть возложены на микроЭВМ (или микроконтроллер). Величины заданного перемещения  $\varphi_3^*$  поступают от вычислительной машины более высокого уровня либо хранятся в блоке памяти микроЭВМ, реализующей задатчик.

На рис.2 приведена обобщенная структурная схема модели цифроаналоговой системы с комбинированным управлением по задающему воздействию. В состав задающей части дискретной части системы входят задающее устройство (ЗУ) и регулятор (Р). ЗУ формирует требуемый во времени закон изменения управляющего воздействия  $g^*$ , равного сумме сигнала желаемого закона отработки регулируемой координаты и его производных, часть из которых может быть подана через преобразователь код – аналог (ПКА) на входы непрерывной части системы (эти сигналы обозначены через  $g^*_{к}$ ).

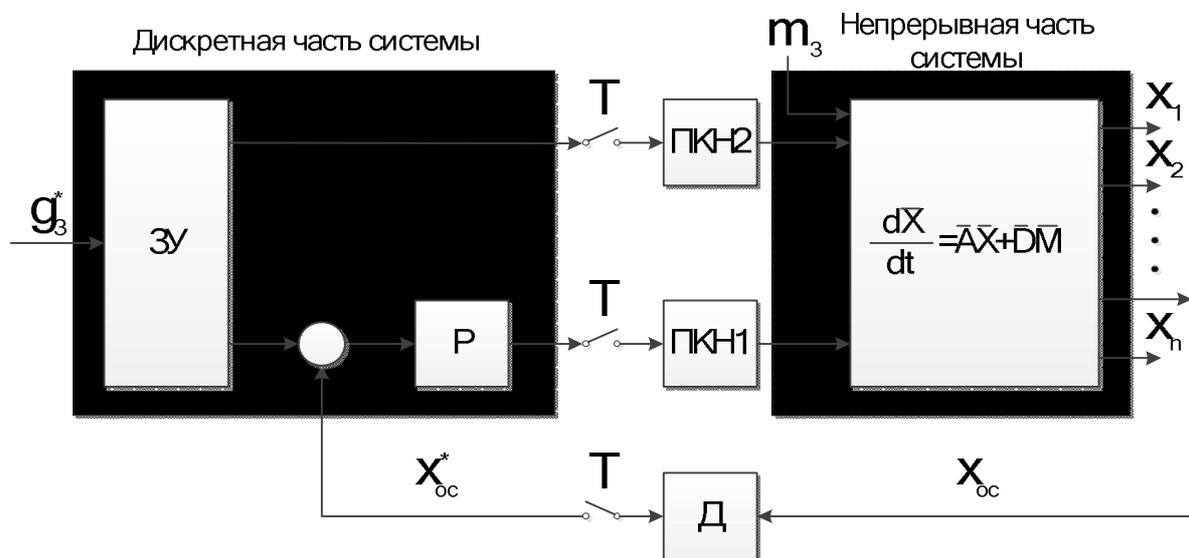


Рисунок 2 - Обобщенная структурная схема цифроаналоговой модели

Звездочкой на схеме обозначены сигналы, связанные с реальными соотношениями

$$x^* = \frac{x}{\Delta_x}, \quad (1)$$

где  $\Delta_x$  - интервал квантования по уровню координаты  $x$ .

Алгоритм работы дискретного регулятора в общем случае можно записать в виде разностного уравнения

$$y^*(nT) = \sum_{i=0}^k b_i \cdot e^*(nT - iT) - \sum_{j=1}^l a_j \cdot y^*(nT - jT), \quad (2)$$

где  $b_i$  и  $a_j$  - соответственно коэффициенты числителя и знаменателя дискретной передаточной функции регулятора.

$e^*(nT - iT)$  - значения сигнала на входе регулятора в моменты времени  $(nT - iT)$ ;

$T$  - период квантования по времени.

$$e^*(nT - iT) = g^*(nT - iT) - x_{oc}^*(nT - iT), \quad (3)$$

где  $x_{oc}^*(nT - iT)$  - содержимое дискретного датчика (Д), связанного с регулируемой координатой  $x_{oc}$  соотношением

$$x_{oc}^* = E \left[ \frac{x_{oc}}{\Delta_x} \cdot D_D(z) \right], \quad (4)$$

где  $D_D(z)$  - дискретная ПФ датчика без учета квантования по уровню;

$E$  - символ целой части.

Динамическое поведение непрерывной части системы может быть описано при помощи дифференциальных уравнений различного вида. При моделировании систем электропривода широкое распространение получил метод пространства состояний [2]. Для применения этого метода динамическая система должна быть описана совокупностью дифференциальных уравнений первого порядка в стандартной форме Коши. В этом случае методы интегрирования, применяемые для решения одного ДУ первого порядка могут быть распространены на систему таких уравнений, записанных в векторно – матричном виде.

Система дифференциальных уравнений, описывающих поведение непрерывного КРС, имеет вид:

$$\begin{cases} x'_1(t) = \beta \cdot x_2(t); \\ x'_2(t) = -4 \cdot \alpha \cdot x_2(t) + x_3(t) - \beta \cdot m_2(t); \\ x'_3(t) = -8 \cdot \alpha^2 \cdot x_2(t) + \frac{8\alpha^3}{\beta} \cdot m_1(t) - \frac{\alpha}{\beta} \cdot x_1(t), \end{cases}$$

$$\text{где } \alpha = \frac{I}{4T_{\mu}}; \quad \beta = \frac{R_{я}}{c \cdot T_M}; \quad m_1(t) = \frac{U_{3C}}{K_{\omega}}; \quad m_2(t) = I_C.$$

В матричной форме эти уравнения могут быть записаны в виде:

$$\begin{pmatrix} x'_1 \\ x'_2 \\ x'_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & \beta & 0 \\ 0 & -4\alpha & 1 \\ -\frac{8\alpha^3}{\beta} & -8\alpha^2 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\beta \\ \frac{8\alpha^3}{\beta} & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} m_1 \\ m_2 \end{pmatrix};$$

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} m_1 \\ m_2 \end{pmatrix}.$$

В качестве координаты  $x_1$  целесообразно принять частоту вращения двигателя  $\omega$ , в качестве координаты  $x_2$  - угловое ускорения двигателя  $\varepsilon$ .

В составе системы Simulink имеется блок State – Space (пространство состояний), обеспечивающий моделирование звена общего вида по его математическому описанию в пространстве состояний:

$$\begin{cases} x'(t) = A \cdot x(t) + B \cdot u(t); \\ y(t) = C \cdot x(t) + D \cdot u(t); \\ x(0) = x_0, \end{cases} \quad (5)$$

где  $x = [x_1, \dots, x_n]^T$  - вектор переменных состояний;

$y = [y_1, \dots, y_k]$  - вектор выходных сигналов;

$u = [u_1, \dots, u_m]^T$  - вектор входных сигналов;

$x_0 = [x_{10}, \dots, x_{n0}]^T$  - вектор начальных условий;

$A$  - матрица состояния размером  $n \times n$ ;

$B$  - матрица входа размером  $m \times n$ ;

$C$  - матрица выхода размером  $k \times n$ ;

$D$  - матрица размером  $k \times m$ , характеризующая прямую связь между входом и выходом.

Для цифроаналоговой САУ вектор управления  $m(t)$  является выходом экстраполятора нулевого порядка. Тогда на интервале  $nt < t \leq (n+1)T$   $m(t) = m(nT^+)$ .

Функции цифровых задатчика и регулятора целесообразно возложить на микроЭВМ. Это позволит достаточно просто реализовать сколь угодно сложные законы движения и организовать связь с вычислительной машиной более высокого уровня. Работу микроЭВМ целесообразно организовать в следующей последовательности:

- вычисление управляющего воздействия  $g^*(nT)$  и сигналов корректирующих связей  $g^*_k(nT)$ , на что затрачивается время  $t_y$ ;
- опрос содержимого дискретного датчика;
- выполнение алгоритма работы цифрового регулятора, на что требуется время  $t_3$ ;
- выдача информации  $y^*(nT)$  и  $g^*_k(nT)$ , которая хранится в течение периода времени  $T$  на входных регистрах соответствующих ПКН.

Время на опрос и выдачу информации можно положить равным нулю. Тогда наименьший период квантования система по времени будет составлять

$$T = t_y + t_3.$$

За начало отсчета работы системы целесообразно принять момент времени опроса содержимого дискретного датчика  $x^*_{oc}(0T)$  (рис.3).

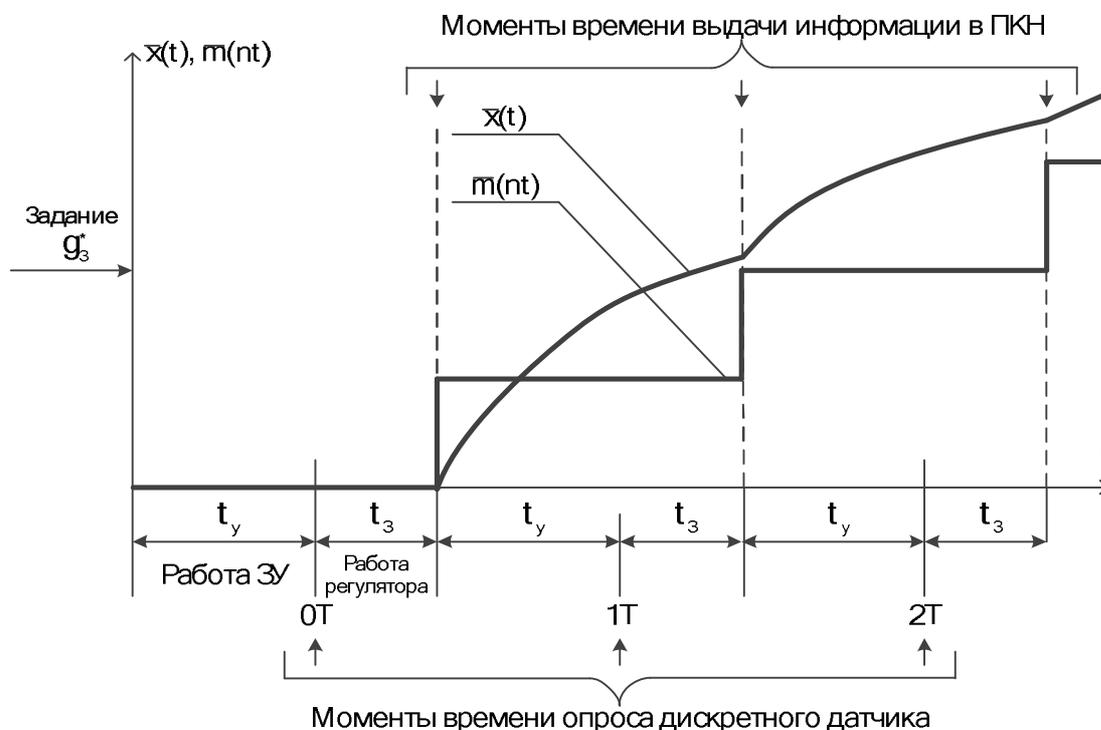


Рисунок 3 - Диаграмма обработки информации в цифроаналоговой системе с комбинированным управлением

Тогда выходной сигнал микроЭВМ  $y^*(nT - t_3)$  формируется с запаздыванием  $t_3$  по отношению к этому и последующим периодам квантования  $1T, 2T, \dots, nT$ . Поэтому смена управляющих воздействий  $m$  осуществляется в моменты времени  $(nT + t_3)$ .

### **Анализ результатов модельных экспериментов**

При проведении модельных экспериментов настройка аналоговых контуров тока и скорости проведена методом двойных пропорций [2]. При этом постоянные времени интегрирования контуров тока и скорости принимались равными

$$T_T = 2 \cdot T_\mu; \quad T_C = 2 \cdot T_T = 4 \cdot T_\mu,$$

где  $T_\mu$  - малая некомпенсируемая постоянная времени КРТ, с.

ЦЗП формирует желаемые во времени законы изменения ускорения  $\varepsilon^*_{ж}(nT)$ , скорости  $\omega^*_{ж}(nT)$  и угла поворота  $\varphi^*_{ж}(nT)$ , а также сигналы компаундирующих связей  $K_1$  и  $K_2$ , позволяющие реализовать принцип комбинированного управления [ 3 ]. Результирующий сигнал задания имеет вид:

$$g^*(nT) = \varphi^*_{ж}(nT) + K_1 \cdot \omega^*_{ж}(nT) + K_2 \cdot \varepsilon^*_{ж}(nT). \quad (5)$$

При проведении исследований были получены аналитические выражения для определения коэффициентов компаундирующих связей  $K_1$  и  $K_2$  ЦЗП на различных участках движения привода (формулы не приведены из – за их громоздкости).

Анализ результатов моделирования цифроаналоговой СРП показал, что при выборе параметров цифровых РП и ЦЗП из условий модульного оптимума [4] перерегулирование по току на всех участках движения привода при наличии корректирующих связей ЦЗП и без них мало зависит от величин  $T(0 \div 20 \text{ мс})$ ,  $T_\mu(4 \div 10 \text{ мс})$  и  $\tau_3(0 \div 1)$  и составляет  $4 \div 7 \%$ . Через  $\tau_3$  обозначена величина, равная  $t_3 / T$ . В качестве примера на рис.4 показаны в относительных величинах графики переходных процессов в СРП при отработке больших перемещений с участками разгона, равномерного движения с постоянной максимальной скоростью  $\omega_M$  и торможения.

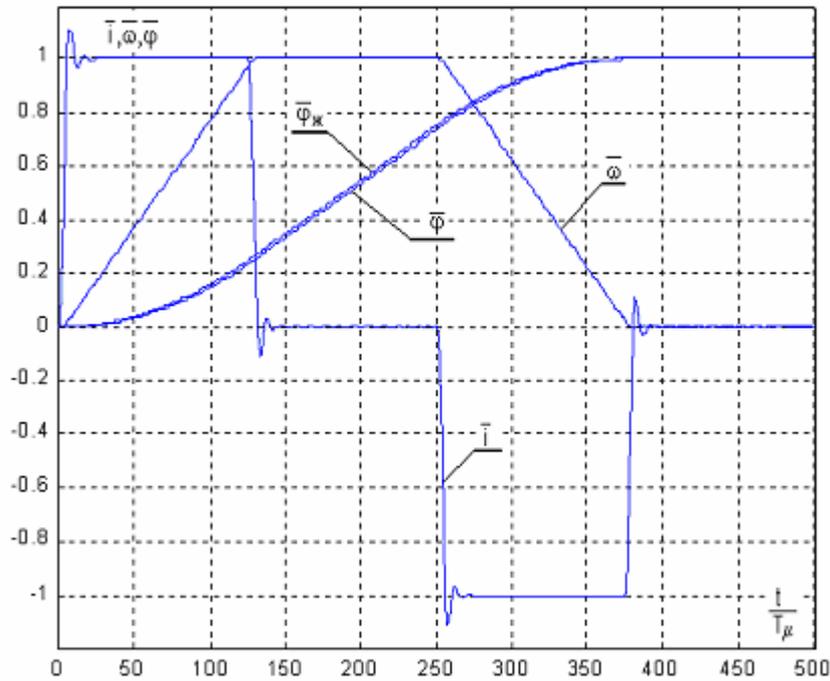


Рисунок 4 - Графіки переходних процесів в СРП

При відсутності коректуючих зв'язей ЦЗП  $K_1$  і  $K_2$  швидкодействие системи знижується з збільшенням періода квантування  $T$  і запозднання  $t_3$ . Використання коректуючих зв'язей дозволяє скомпенсувати додаткову інерційність СРП, обумовлену ефектом квантування по часу і часовою запозднання. При виборі коефіцієнтів  $K_1$  і  $K_2$  ЦЗП з умов модульного оптимума [4] часи першого узгодження току  $t_c$  з установившимся значенням і досягнення током максимального значення  $t_M$  при обробці управляючих впливів практично не залежать від величин  $T/T_\mu$  і  $\tau_3$  (в вказаному вище діапазоні їх змін) і складають  $t_c \approx (6 \div 8)T_\mu$ ,  $t_M \approx (9 \div 10)T_\mu$ , що, як мінімум, в два рази менше, ніж в системі з принципом управління по відхиленню, і близькі до значень, отриманих в аналогічній неперервній СРП.

Результати дослідження переходних процесів в СРП наведені на рис.5,а і рис.5,б. На рис.5,а наведено графік залежності  $n_M(T/T_\mu, \tau_3)$ , де  $n_M$  - номери тактів, на яких ток якоря двигача досягає максимального значення  $i(n_M T) = i_M$ . Сплошними лініями на графіках позначені відповідні залежності в СРП з принципом управління по відхиленню (УО), пунктирними - в комбінованій системі (КУ). Графіки наочно

подтверждают эффективность СРП с КУ. Моменты времени  $t_c$  и  $t_M$  могут быть определены из формул:  $t_c \approx n_C T$ ,  $t_M \approx n_M T$ .

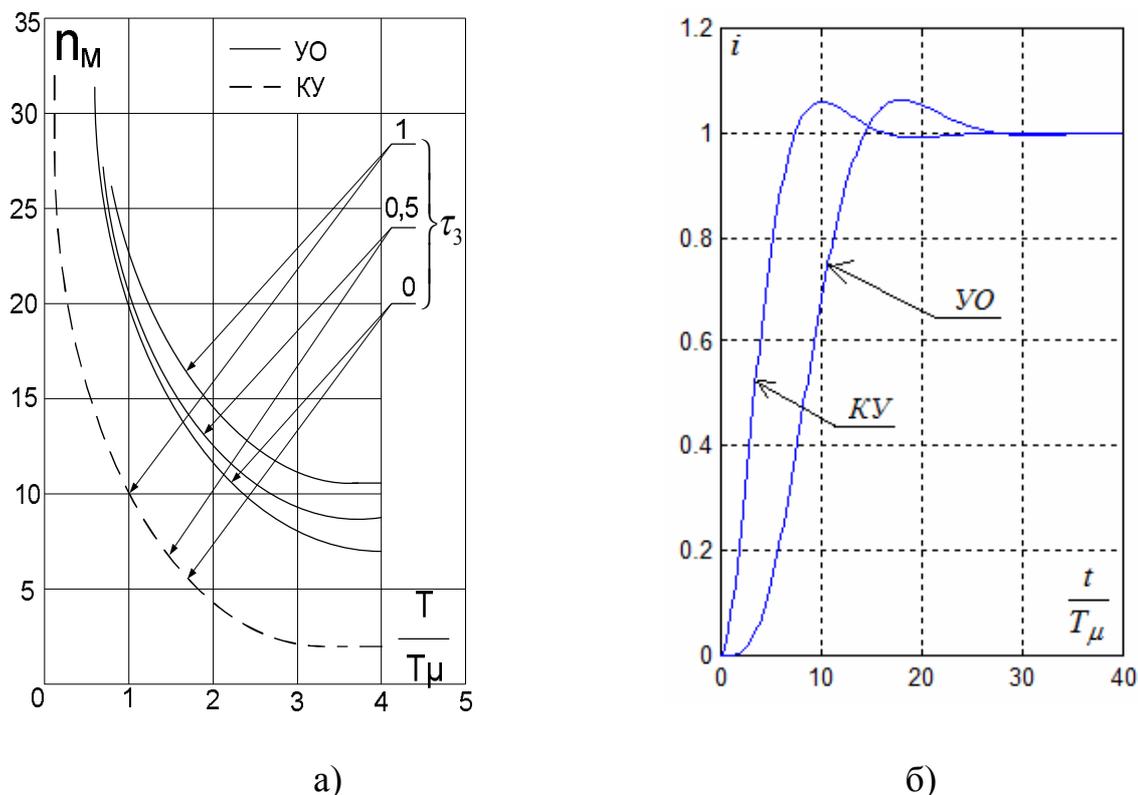


Рисунок 5 - Графики зависимостей: а) -  $n_M(T/T_\mu, \tau_3)$ ; б) -  $i(t/T_\mu)$

На рис.5,б показан график начального участка изменения тока якоря двигателя  $i$  (пропорционального ускорению привода) в СРП с КУ и с принципом управления по отклонению (УО). Этот график наглядно демонстрирует эффективность использования комбинированного управления в рассмотренной СРП.

### Выводы

1. При отсутствии корректирующих связей быстродействие СРП снижается с увеличением периода квантования  $T$  и временного запаздывания  $t_3$ .

2. Использование комбинированного управления позволяет скомпенсировать дополнительную инерционность системы, обусловленную эффектом квантования по времени и запаздывания.

3. При выборе корректирующих коэффициентов ЦЗП и регулятора положения из условий МО время  $t_c$  при отработке управляющих воздействий практически не зависит от величин  $T/T_\mu$  и  $\tau_3$  (в указанном выше диапазоне их изменения) и составляет

величину  $t_c \approx (6 \div 8) T_\mu$ , що, як мінімум, в два рази менше, чем в системі с принципом управління по відхиленню.

### **Список литературы**

1. Ильинский Н.Ф. Электропривод в современном мире [Текст] / Н.Ф. Ильинский // Сб. тр. V Международной конференции по автоматизированному электроприводу. – СПб, 2007. – С.17 - 19.
2. Перельмутер В.М. Цифровые системы управления тиристорным электроприводом [Текст] / В.М. Перельмутер, А.К. Соловьев. – К.: Техніка, 1983. – 104 с.
3. Hoffman J. MATLAB and SIMULINK. Beispielerorientierte Einführung in Simulation dynamischer Systeme / J. Hoffman. – Bonn: Addison – Wesley – Longman, 1998 - 493 s.
4. Синтез дискретных систем управления по модульному оптимуму [Текст] / П.Х. Коцегуб, Е.В. Колчев, Ю.В. Губарь, и др. // Известия вузов. Электромеханика. – 1983. – № 4. – С.9 -13.

*Надійшла до редакції 10.09.2011*

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. Святний В.А.*

#### **Ю. В. Губарь**

Донецький національний технічний університет

**Дослідження динамічних процесів цифроаналогової системи позиційного електропривода з комбінованим керуванням методом математичного моделювання.** Методом математичного моделювання в середовищі Matlab + Simulink виконано дослідження перехідних процесів у системі регулювання положення (СРП) з комбінованим керуванням, від впливу ефектів квантування за часом і часового запізнювання, яке викликане роботою цифрової частини системи. Показано, що за рахунок раціонального вибору параметрів СРП із умов модульного оптимуму вдається компенсувати негативний вплив ефектів квантування за часом і часового запізнювання та поліпшити динамічні показники системи.

**Ключові слова:** позиційний електропривод, моделювання, простір станів, перехідний процес, квантування за часом.

#### **Y.V.Gubar**

Donetsk National Technical University

**Research of Dynamic Processes of Digit-Analogue System of the Positional Electric Drive with the Combined Management with Help of the Method of Mathematical Modeling.** By means of mathematical modeling in the Matlab+Simulink environment was complete the research of transients in Position Regulation System (PRS) with the combined management on setting influence from quantization influence on time and the time delay caused by work of a digital part of system is executed. It is shown, that for the account of a rational choice of parametres PRS from conditions of a modular optimum, it is possible to compensate negative influence of effects of quantization on time and time delay and to improve dynamic indications of system.

**Keywords:** The positional electric drive, modeling, space of conditions, transitive process, quantization by time.