

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малкин И. Г. Теория устойчивости движения. – М.: Наука, 1966.
2. Моисеев Н. Н. Асимптотические методы нелинейной механики. – М.: Наука, 1981.
3. Пельпор Д. С., Матвеев В. А., Арсеньев В. Д. Динамически настраиваемые гироскопы: Теория и конструкция. – М.: Машиностроение, 1988.
4. Филатов В. В., Шабаетов В. И., Шаталов М. Ю. Влияние нелинейных эффектов на точность динамически настраиваемого гироскопа // Изв. АН СССР. Сер. Механика твердого тела. – 1981. – № 6.

Статья поступила в редакцию 30.10.2003

Ирина Геннадьевна Солдатенко родилась в 1971 г., окончила в 1998 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Ассистент кафедры “Прикладная математика” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор трех научных работ в области устойчивости гироскопических систем, нелинейных колебаний, стабилизации движения.

I.G. Soldatenko (b. 1971) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 1998. Assistant of “Applied Mathematics” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 3 publications in the field of gyroscopic system stability, nonlinear oscillations, motion stability.



СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 621.313

В. М. Б у я н к и н, В. М. Р у с а к о в

ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ ВОЗМУЩАЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ТОЧНОСТЬ РАБОТЫ МИКРОПРОЦЕССОРНОГО ПРИВОДА

Исследована цифровая модель привода, описываемая дифференциальными уравнениями. Проведено цифровое моделирование влияния внешнего возмущающего воздействия на точность работы микропроцессорного привода. Построены переходные процессы скорости и ошибок рассогласования микропроцессорного привода.

В настоящее время к статической и динамической точности работы цифрового микропроцессорного электропривода (ЦЭП) предъявляются повышенные требования. Особенно важна высокая стабильность работы при внешних возмущающих воздействиях.

Работа ЦЭП с дискретными элементами, которые осуществляют амплитудно-импульсную модуляцию рабочих сигналов, описывается дифференциальными уравнениями.

Из-за амплитудно-импульсной модуляции снижается точность работы ЦЭП, а иногда возникают режимы автоколебаний, поэтому исследование влияния внешнего возмущающего воздействия на статическую и динамическую точность ЦЭП представляют большой интерес.

На рис. 1 представлена структурная схема ЦЭП с импульсными элементами ИЭ1, ИЭ2, ИЭ3 относительно внешнего возмущающего момента $M_{вн}$, которая описывается следующими уравнениями:

уравнением ошибки в путевом контуре

$$n_3 - n_d = \varepsilon_1, \quad (1)$$

уравнением путевого интегрального регулятора

$$\varepsilon_1 D_{ks} = \varepsilon_s, \quad D_{ks} = \frac{k_{yc}}{z - 1}, \quad (2)$$

уравнением ошибки в скоростном контуре

$$\varepsilon_s - n_d = \varepsilon_v, \quad (3)$$

уравнением скоростного пропорционально-интегрального регулятора

$$\varepsilon_v D_{kv} = \Theta_0, \quad D_{kv} = \frac{z(k_{п} + k_{и}) - k_{п}}{z - 1}, \quad (4)$$

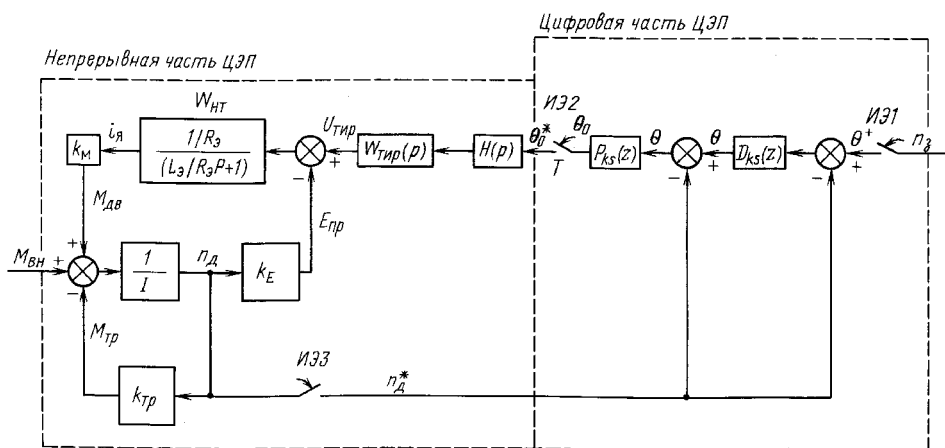


Рис. 1. Структурная схема ЦЭП

уравнением формирующего элемента

$$\Theta_0 H(p) = \Theta, \quad (5)$$

уравнением тиристорного преобразователя

$$\Theta k_{\text{тир}} = U_{\text{тир}}(T_{\text{тир}} p + 1), \quad (6)$$

уравнениями исполнительного электродвигателя постоянного тока

$$L_3 p i_{\text{я}} + R_3 i_{\text{я}} + E_{\text{пр}} = U_{\text{тир}}, \quad (7)$$

$$I p n_{\text{д}} + M_{\text{тр}} = M_{\text{дв}} + M_{\text{вн}}, \quad (8)$$

$$E_{\text{тир}} = k_E n_{\text{д}}, \quad (9)$$

$$M_{\text{тр}} = k_{\text{тр}} n_{\text{д}}, \quad (10)$$

$$M_{\text{дв}} = k_M i_{\text{я}}, \quad (11)$$

где n_3 — заданная частота вращения; $n_{\text{д}}$ — частота вращения электродвигателя; ε_1 — ошибка регулирования в скоростном контуре; D_{ks} — передаточная функция путевого контура; ε_s — ошибка регулирования в путевом контуре; k_{yc} — коэффициент усиления путевого регулятора; ε_v — ошибка регулирования в скоростном контуре; D_{kv} — передаточная функция скоростного регулятора; $k_{\text{п}}$ — коэффициент пропорциональной составляющей ошибки скоростного регулятора; $k_{\text{и}}$ — коэффициент интегральной составляющей ошибки скоростного регулятора; Θ_0 — сигнал на выходе регулятора скоростного контура; $H(p)$ — передаточная функция формирующего элемента; Θ — сигнал на выходе формирующего элемента; $U_{\text{тир}}$ — напряжение на выходе тиристорного преобразователя; $i_{\text{я}}$ — ток якоря в цепи электродвигателя; $E_{\text{пр}}$ — ЭДС исполнительного электродвигателя; $M_{\text{тр}}$ — момент трения; $M_{\text{дв}}$ — движущий момент, развиваемый электродвигателем; $L_3 = 3,1 \cdot 10^{-2}$ Гн — эквивалентная суммарная индуктивность якорной цепи; $R_3 = 3,5$ Ом — эквивалентное сопротивление якорной цепи; $k_E = 8 \cdot 10^{-1}$ В·с/рад — коэффициент ЭДС; $k_M = 9 \cdot 10^{-1}$ Н·м/А — коэффициент момента; $k_{\text{тир}} = 1,1$ В·с/рад — коэффициент передачи тиристорного преобразователя; $T_{\text{тир}} = 10^{-2}$ с — постоянная времени тиристорного преобразователя; $I = 8 \cdot 10^{-2}$ кг·м² — суммарный момент инерции, приведенный к валу электродвигателя; $k_{\text{тр}} = 1,4 \cdot 10^{-3}$ кг·м²/с — коэффициент вязкого трения на валу электродвигателя (в качестве примера взяты расчетные параметры электродвигателя постоянного тока ПБСТ-22 с номинальными параметрами $P_{\text{н}} = 0,6$ кВт, $U_{\text{тн}} = 110$ В, $i_{\text{ян}} = 7$ А).

Ключи ИЭ1, ИЭ2, ИЭ3 обеспечивают дискретность по времени приема информации с датчика обратной связи, задания и выдачи цифро-

го кода в импульсно-фазовую систему управления тиристорного преобразователя, который для упрощения расчетов представлен безынерционным звеном. Модель представляет собой линейную цифровую систему с амплитудно-импульсной модуляцией.

Последовательное соединение формирующего элемента и непрерывной части (тиристорного преобразователя и электродвигателя постоянного тока) образует так называемую приведенную непрерывную часть ЦЭП, передаточная функция которой имеет вид

$$W_{\text{нт}}(p) = \frac{k_1}{Ap^2 + Bp + C}, \quad (12)$$

где $k_1 = k_M k_{\text{тир}} = 8,8 \cdot 10^{-1} \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{Ом}/(\text{с}/\text{рад})$; $A = L_3 I = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{с} \times \text{кг} \cdot \text{м}^2$; $B = IR_3 + k_{\text{тр}} L_3 = 2,8 \cdot 10^{-1} \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{Ом}$; $C = k_{\text{тр}} R_3 + k_E k_M = 6,4 \times 10^{-1} \text{ Ом} \cdot \text{кг} \cdot \text{м}^2/(\text{рад}/\text{с})$; отсюда получим

$$W_{\text{нт}}(p) = \frac{k_1}{T_{01} p^2 + 2\xi_{01} T_{01} p + C}, \quad (13)$$

где

$$T_{01} = \sqrt{\frac{A}{C}}, \quad \xi_{01} = \frac{B}{2C} \sqrt{\frac{C}{A}}.$$

Рассмотрим составляющую ошибки, обусловленную возмущающим воздействием $M_{\text{вн}}$, выражение для которой может быть получено из системы уравнений (1)–(11), при $n_3 = 0$. Решая систему уравнений (1)–(11), получим

$$\begin{aligned} -n_d^* (D_{ks} D_{kv} + D_{kv}) &= \Theta^*, \\ \Theta^* H(z) W_{\text{тир}}(p) &= U_{\text{тир}}; \end{aligned} \quad (14)$$

здесь знаком * отмечены z -преобразованные величины.

Введем следующие обозначения:

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{L_3 I}{k_M}, \\ a_2 &= \frac{k_{\text{тр}} I}{k_M} + \frac{R_3 I}{k_M}, \quad a_3 = \frac{R_3 k_{\text{тр}}}{k_M} + k_E, \\ b_1 &= \frac{L_3}{k_M}, \quad b_2 = \frac{R_3}{k_M}. \end{aligned} \quad (15)$$

Применяя к выражениям (14), (15) z -преобразование и делая допущение, что $M_{\text{вн}}$ действует только в дискретные моменты времени, получим

$$\frac{n_d(z)}{M_{\text{вн}}(z)} = \frac{z(b_1 + b_2)}{(D_{ks}(z)D_{kv}(z) + D_{kv}(z))z(H(p)W_{\text{тип}}(p)) + z(a_1 + a_2 + a_3)}. \quad (16)$$

Применяя теорему о конечном значении дискретной функции при наличии возмущающего момента постоянной величины M_0 , получим

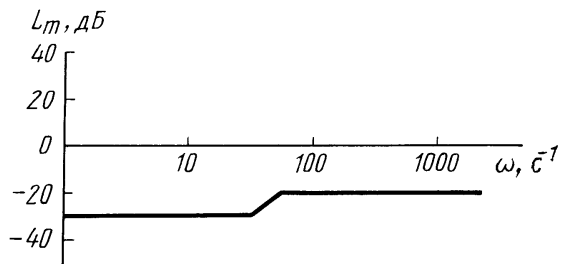
$$n_d(nt) = \lim_{\substack{z \rightarrow 1 \\ n \rightarrow \infty}} \frac{z(b_1 + b_2)}{(D_{ks}(z)D_{kv}(z) + D_{kv}(z))z(H(p)W_{\text{тип}}(p)) + z(a_1 + a_2 + a_3)}. \quad (17)$$

Из выражения (17) при заданном возмущающем воздействии $M_{\text{вн}}$ можно определить моментную составляющую ошибки. Учтем влияние на точность ЦЭП гармонического возмущающего воздействия $M_{\text{вн}}(t) = M_0 \sin(\omega t)$ и, используя передаточную функцию (16), построим логарифмическую амплитудно-частотную характеристику моментной составляющей ошибки ЦЭП по отношению к возмущающему воздействию (рис. 2).

Для получения конкретных переходных процессов, вызванных внешними возмущающими воздействиями в ЦЭП, было проведено цифровое моделирование системы уравнений (1)–(11). Цифровое моделирование — это математическое моделирование с применением ЭВМ и использованием дискретных форм представления непрерывной информации, позволяющее исследовать с большой точностью количественные и качественные взаимозависимости между элементами сложных динамических систем. Поскольку ЭВМ производит вычисление не функции времени, а функции текущего номера шага интегрирования, то при любом быстродействии ЭВМ полученный переходный процесс будет соответствовать реальному масштабу времени. Большая ширина разрядной сетки ЭВМ, как правило, позволяет выбирать масштабные коэффициенты машинных переменных численно равными единице. Структурная схема программы цифрового моделирования

Рис. 2. Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика моментной составляющей ошибки

($L_m = \frac{n_d(\omega, 0)}{M_{\text{вн}}(\omega, 0)}$, ω — частота входного сигнала)



ЦЭП представлена на рис. 3. На рис. 4 и 5 приведены результаты цифрового моделирования переходных процессов в ЦЭП при скачкообразном изменении величины внешнего возмущающего воздействия.

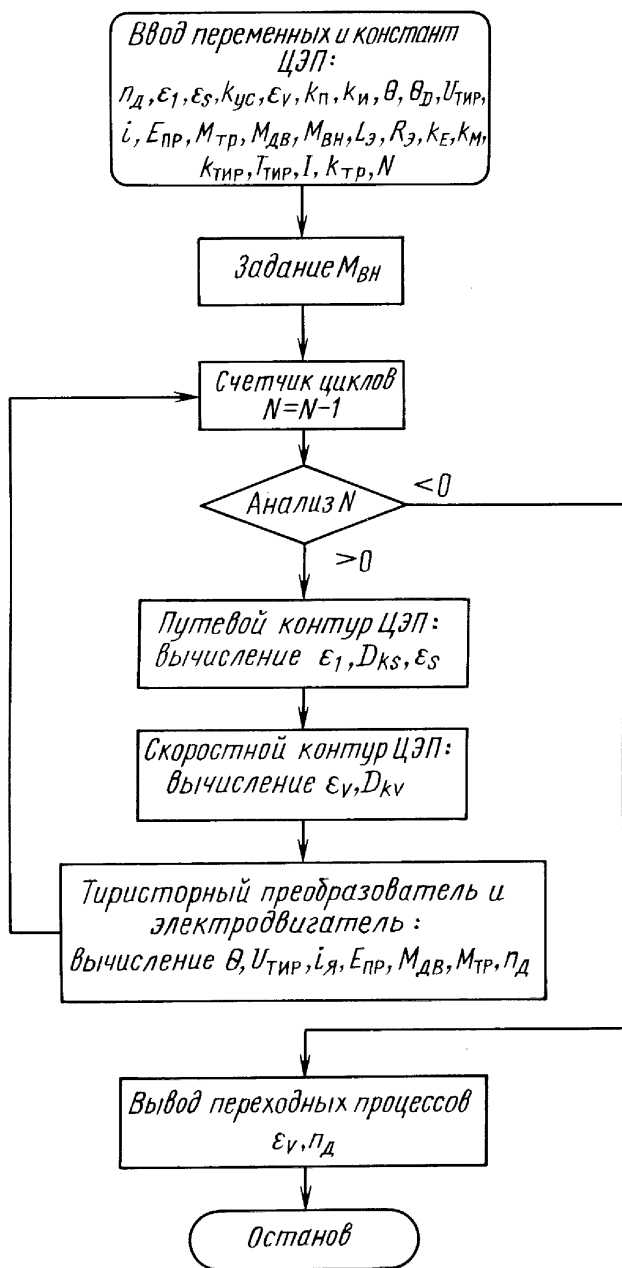


Рис. 3. Структурная схема программы цифрового моделирования ЦЭП (N — число циклов)

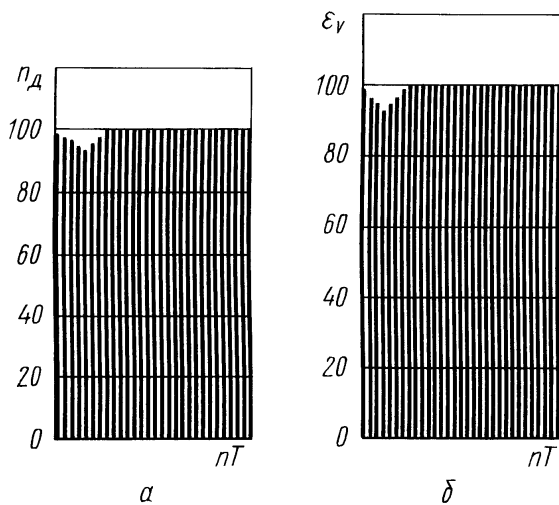


Рис. 4. Переходный процесс в ЦЭП:

a — при $T = 0,1T_{\text{тир}}$, $M_{\text{вн}} = 0,3M_{\text{н}}$; *б* — при $T = 0,1T_{\text{тир}}$, $M_{\text{вн}} = 0,6M_{\text{н}}$ ($M_{\text{н}}$ — номинальный вращающий момент двигателя)

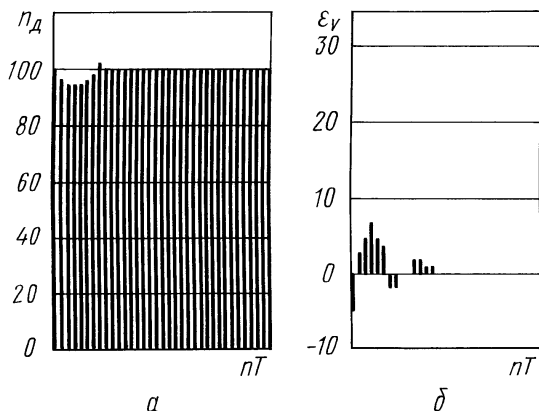


Рис. 5. Результаты цифрового моделирования переходных процессов n_d (*a*) и ε_v (*б*) в ЦЭП при скачкообразном изменении величины внешнего возмущающего воздействия:

$M_{\text{вн}} = 0,3M_{\text{н}}$ (*a*) и $M_{\text{вн}} = 0,6M_{\text{н}}$ (*б*)

Из приведенных рисунков видно, что ЦЭП с прямым микропроцессорным управлением обладает высокой статистической и динамической точностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буянкин В. М., Кравец В. А., Семенов В. С. Изучение цифрового электропривода постоянного тока с прямым микропроцессорным управлением: Методические указания к лабораторной работе по курсу "Основы электропривода" / Под ред. Ю.И. Даниленко. — М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1982. — 12 с.

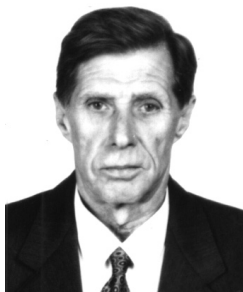
2. Буянкин В. М., Шамгулов Р. О. Программно-математическое обеспечение микропроцессорного привода в лаборатории электропривода. – М., 1991. – бс. – Деп. в ВНИИВО 06.07.91, № 1151-91.
3. Буянкин В. М., Пуцов А. Ф., Романенко А. М. Разработка и исследование цифрового электропривода на базе микро-ЭВМ. – М., 1990. – Деп. в ВНИИТЭРМ.
4. Буянкин В. М., Бочкарев О. Е., Добровольская Т. А. Микропроцессорный электропривод. – М.: МДНТП, 1990.
5. Буянкин В. М., Кравец В. А., Семенов В. С., Шамгулов Р. О. Применение оборудования по микропроцессорному приводу в лаборатории электропривода. – М., 1991. – Деп. в ВНИИВО № 1148-91.
6. Герман-Галкин С. Г. и др. Цифровые электроприводы с транзисторными преобразователями. – Л.: Энергоиздат, 1986.

Статья поступила в редакцию 13.02.2003



Виктор Михайлович Буянкин родился в 1951 г., окончил в 1977 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Электротехника и промышленная электроника” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 50 научных работ в области электротехники и промышленной электроники.

V.M. Buyankin (b. 1951) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1977. Ph.D. (Eng.) ass. professor of “Electrical Engineering and Industrial Electronics” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 50 publications in the field of electrical engineering and industrial electronics.



Владимир Михайлович Русаков родился в 1934 г., окончил в 1962 г. Московский энергетический институт (МЭИ). Старший преподаватель кафедры “Электротехника и промышленная электроника” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор около 20 научных работ в области электротехники и промышленной электроники.

V.M. Rusakov (b. 1934) graduated from Moscow Institute for Power Engineering in 1962. Senior teacher of “Electrical Engineering and Industrial Electronics” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of about 20 publications in the field of electrical engineering and industrial electronics.