

УДК 629.11.032

ГУРСКИЙ Н. Н., НАЖЖАРИН М., БНТУ

SIMULINK-МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ БОЛЬШЕГРУЗНОЙ МАШИНЫ С НЕЙРО-КОНТРОЛЛЕРОМ В КОНТУРЕ УПРАВЛЕНИЯ

Рассмотрена модель контроллера на базе искусственной нейронной сети. Приведена математическая модель динамического объекта, описывающая прямолинейное курсовое движение мобильной машины. Расчетная схема динамического объекта включает силовой блок, трансмиссию, колесо и массу машины. Представлены сравнительные результаты управления скоростью движения машины с помощью различных контроллеров без и с учетом нелинейностей характеристик элементов модели машины.

A model of the controller based on artificial neural network. A mathematical model of the dynamic object that describes the linear movement of the mobile machine Course. Design scheme of dynamic object includes the power unit, transmission, wheel and weight machines. The comparative results of speed control of the machine through a variety of controllers with and without taking into account the non-linear characteristics of the model elements of the machine.

Введение

При проведении исследований с целью достижения требуемых динамических показателей транспортных средств, в частности, большегрузных машин, необходимы математические и компьютерные модели динамики механических систем, силовых модулей, а также контроллеров управления такими системами.

Обычно на разных уровнях и для управления отдельными элементами и узлами наиболее широко используются PID-регуляторы. Вместе с тем, реальные элементы и узлы обладают нелинейными параметрами и характеристиками. В этом случае PID-регуляторы либо не в полной мере, либо вообще не обеспечивают работу системы. Наиболее приемлемым аппаратом для управления такими объектами могут служить искусственные нейронные сети [1]. В основе нейроинтеллекта лежит нейронная организация искусственных систем, которая имеет биологические предпосылки. Способность биологических систем к обучению, самоорганизации и адаптации обладает большим преимуществом по сравнению с современными вычислительными системами.

В данной статье рассматриваются модели поступательного прямолинейного движения мобильной машины, силового модуля – двигателя и приводится сравнительный анализ управ-

ления движением данного объекта с помощью двух контроллеров: PID-контроллера и НС-нейроконтроллера на основе искусственной нейронной сети (НС).

Модель контроллера на основе искусственной нейронной сети

При проектировании системы управления динамическими процессами, сопровождающими движение мобильной машины, рассмотрим нейронную сеть контроллера на основе модели авторегрессии со скользящим средним (NARMA-L2 – *nonlinear autoregressive moving-average*). Такая модель может интерпретироваться как дискретно-временная нелинейная система, в которой в качестве переменных выступают значения самих переменных в предыдущие моменты времени, например, в форме:

$$y(k+d) = N[y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1), u(k), u(k-1), u(k-m+1)], \quad (1)$$

где $u(k-n+1)$ – входное значение системы в $(k-n+1)$ -й момент времени; k – текущий номер времени; $n = 1, 2, \dots$ – номер задержки времени входной переменной; $y(k-m+1)$ – выходное значение системы в $(k-m+1)$ -й момент времени; $m = 1, 2, \dots$ – номер задержки времени выходной переменной; d – число тактов предсказания, задержка системы относительно входа; N – нелинейная аппроксимирующая функция.

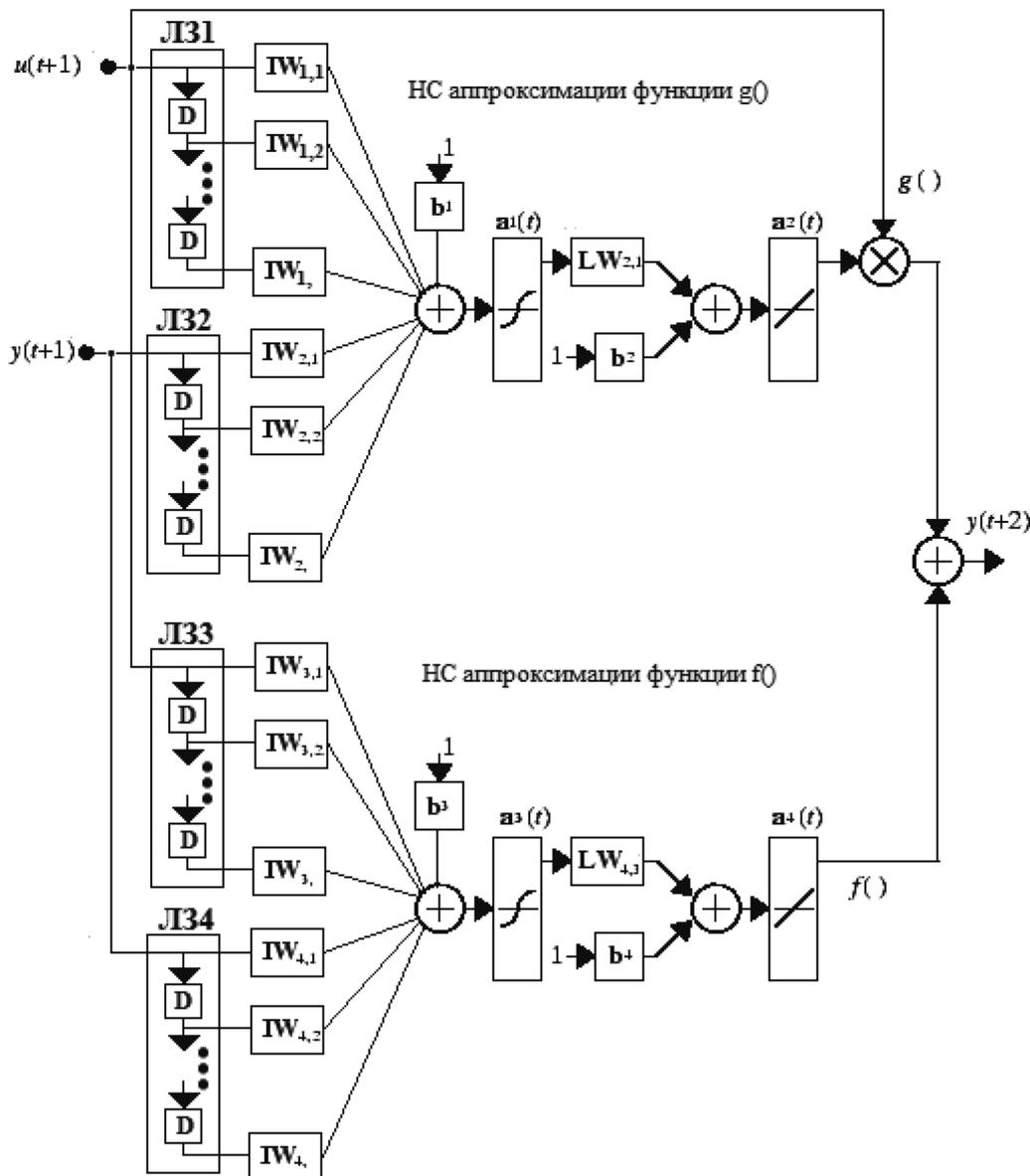


Рис. 1. Структура НС управления динамическим объектом

При проектировании управляемых систем, обеспечивающих желаемые (требуемые) свойства движения, например, следящей системы, обеспечивающей движение по заданной траектории, должно выполняться равенство:

$$y(k+d) = \overline{y(k+d)}, \quad (2)$$

где $\overline{y(k+d)}$ – желаемое значение выхода (заданное (эталонное) значение траектории движения).

Для модели (1) с учетом (2) можно синтезировать следящий нелинейный регулятор:

$$u(k) = G[y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1), \overline{y(k+d)}, u(k-1), u(k-2), \dots, u(k-m+1)].$$

Такой регулятор может быть построен, однако практического применения он не имеет вследствие больших временных затрат, связанных с необходимостью вычисления оптимального управляющего сигнала на каждом временном шаге. Модифицированная модель нейронной сети (1), называемая NARMA-L2, является приближенной, но, позволяющей значительно увеличить быстродействие построенного на ее основе контроллера. Она имеет вид [2]:

$$\overline{y(k+d)} = f[y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1), u(k-1), u(k-m+1)] + g[y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1), u(k-1), u(k-m+1)] \cdot u(k). \quad (3)$$

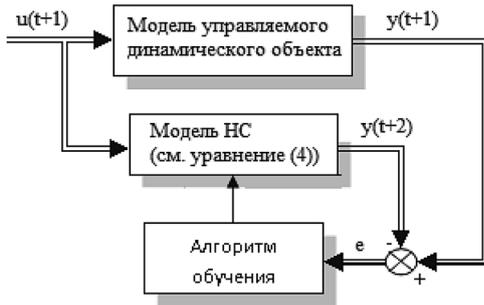


Рис. 2. Схема идентификации параметров нейронной сети

Как видно, модификация заключается в том, что функция N представляется двумя функциями и выделяется в явном виде составляющая управления $u(k)$, которую теперь можно непосредственно вычислить из (3), зная желаемое значение выхода $y(k+d)$, предысторию управления $\{u(k-1), u(k-m+1)\}$, а также текущее и задержанные выходные сигналы объекта управления $\{y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1)\}$. Таким образом исключается выполнение на каждом шаге по времени процедуры оптимизации для вычисления оптимального управления.

В зависимости (3) имеется некорректность, связанная с тем, что управляющее воздействие $u(k)$, зависит от выходной величины $y(k)$. Чтобы разрешить эту неточность, следует сдвинуть на один шаг по времени управляющий сигнал и, соответственно, желаемое значение выходного сигнала.

В результате окончательно получим:

$$\begin{aligned} \overline{y(k+d)} &= f[y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1), \\ &u(k-1), u(k-m+1)] + g[y(k), y(k-1), \dots, \\ &y(k-n+1), u(k-1), u(k-m+1)] \cdot u(k+1). \end{aligned} \quad (4)$$

При этом $d \geq 2$.

Далее по математической модели (4) построим нейронную многослойную сеть управления динамическим объектом (мобильной машины), структура которой приведена на рис. 1.

На рис. 1 приняты следующие обозначения: ЛЗ – линия задержки; D (Delay) – один временной шаг задержки; IW (Input Weight) – матрица весов входа; LW (Layer Weight) – матрица весов слоя; b – вектор смещений.

Спроектированная модель нейронной сети управляемого объекта должна быть обучена, т. е. выполнена идентификация ее параметров

в групповом режиме с использованием одного из алгоритмов обучения. Схема идентификации параметров нейронной сети представлена на рис. 2.

Как видно из рис. 2, в процессе обучения минимизируется ошибка между реакциями на пробные управляющие воздействия со стороны динамического процесса и построенной нейросетевой модели (4). Полученные в результате обучения параметры модели нейронной сети, в дальнейшем используются нейроконтроллером для управления динамическим объектом.

Математическая модель поступательного движения мобильной машины

В основу используемой динамической модели мобильной машины положена расчетная схема [3], приведенная на рис. 3.

В качестве силового модуля может быть использован тепловой, электрический или иной двигатель с обобщенными параметрами и переменными, как показано на рисунке. Силовой модуль может быть дополнен блоками управления и другими элементами.

Уравнения движения системы «двигатель–колесо–поступательно движущаяся масса машины» без учета диссипации энергии имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} J_d \ddot{\varphi}_d + C_t(\varphi_d - \varphi_k) &= M_d, \\ J_k \ddot{\varphi}_k - C_t(\varphi_d - \varphi_k) + C_{sh}(\varphi_k - \varphi_m) &= -M_f, \\ J_m \ddot{\varphi}_m - C_{sh}(\varphi_k - \varphi_m) &= 0, \\ \dot{\varphi}_d|_{t=0} = \dot{\varphi}_{d0}, \varphi_d|_{t=0} = \varphi_{d0}; \\ \dot{\varphi}_k|_{t=0} = \dot{\varphi}_{k0}, \varphi_k|_{t=0} = \varphi_{k0}; \\ \dot{\varphi}_m|_{t=0} = \dot{\varphi}_{m0}, \varphi_m|_{t=0} = \varphi_{m0}. \end{aligned} \right\} (5)$$

где: J_d – момент инерции двигателя; J_k – момент инерции колеса; J_m – момент инерции маховика, эквивалентного поступательно движущейся полной массе машины m_m ; M_d – кру-

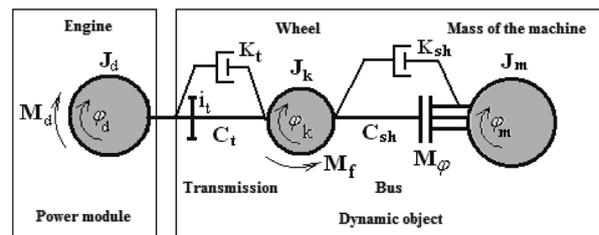


Рис. 3. Расчетная схема динамики большегрузной машины

тящий момент двигателя; M_f – момент сопротивления качению колеса; C_t – жесткость вала трансмиссии; C_{sh} – жесткость шины.

На рис. 3 обозначено: i_t – передаточное отношение редуктора трансмиссии; M_ϕ – момент сцепления колеса с дорогой; K_t , K_{sh} – коэффициенты вязкого сопротивления соответственно вала трансмиссии и шины.

Угол поворота и угловая скорость колеса, приведенные к двигателю, определяются выражениями:

$$\begin{aligned}\varphi_k &= \varphi_d / i_t, \\ \dot{\varphi}_k &= \dot{\varphi}_d / i_t.\end{aligned}$$

Маховик и колесо связаны между собой не жестко, а через шину, имеющую тангенциальную (угловую) жесткость C_{sh} . Передача вращающего момента от колеса $M_k = C_{sh}(\varphi_k - \varphi_m)$ к маховику и наоборот возможна только при наличии продольной составляющей реакции дороги, которая ограничивается сцеплением колеса с дорогой. Момент M_k называют окружным моментом колеса. Его значение не должно превышать момента сцепления колеса с дорогой

$$M_\phi = \phi R_z r_k.$$

Здесь: ϕ – коэффициент сцепления колеса с дорогой; r_k – радиус колеса; $R_z = m_m g$ – нормальная составляющая реакции дороги; g – ускорение свободного падения. При отрыве колес от дороги $M_\phi = 0$.

Система уравнений движения (5) в явном виде поступательно движущейся массы машины имеет вид:

$$\left. \begin{aligned}J_d \ddot{\varphi}_d + C_t(\varphi_d - \varphi_k) &= M_d, \\ J_k \ddot{\varphi}_k - C_t(\varphi_d - \varphi_k) + C_{sh}(\varphi_k - \varphi_m) &= 0, \\ P_l - P_k &= -P_f.\end{aligned} \right\} (6)$$

где $P_l = m_m \ddot{x}$, $P_k = M_k / r_k$, $P_f = M_f / r_k$.

Колебания массы машины в продольном направлении обусловлены тангенциальными деформациями шин (углами их закручивания). Величина деформации определяется по формуле

$$\delta_k = \varphi_k - \varphi_m,$$

где $\varphi_m = x / r_k$ – угол закручивания шины, x, \dot{x}, \ddot{x} – соответственно перемещение, скорость и ускорение центра масс машины в продольном направлении.

Упругий момент, закручивающий шину (окружной момент колеса), и упругая тангенциальная сила (окружная сила колеса) определяются соответственно выражениями:

$$\begin{aligned}M_k &= C_{sh}(\varphi_k - x / r_k), \\ P_k(\delta_k) &= C_{sh}(\varphi_k - x / r_k) / r_k.\end{aligned}$$

С учетом диссипации энергии, вызванной внутренним трением в системе, система уравнений (6) имеет вид:

$$\left. \begin{aligned}J_d \ddot{\varphi}_d + C_t(\varphi_d - \varphi_k) + K_t(\dot{\varphi}_d - \dot{\varphi}_k) &= M_d, \\ J_k \ddot{\varphi}_k - C_t(\varphi_d - \varphi_k) - K_t(\dot{\varphi}_d - \dot{\varphi}_k) + \\ C_{sh}(\varphi_k - \varphi_m) + K_{sh}(\dot{\varphi}_k - \dot{\varphi}_m) &= 0, \\ P_l - P_k &= -P_f.\end{aligned} \right\} (7)$$

Для проведения расчетов запишем систему уравнений (7) с учетом передаточного отношения редуктора, позволяющего привести все параметры к одной точке, например, к двигателю. В результате получим:

$$\left. \begin{aligned}J_d \ddot{\varphi}_d + \frac{C_t}{i_t^2}(\varphi_d - \varphi_k) + \frac{K_t}{i_t^2}(\dot{\varphi}_d - \dot{\varphi}_k) &= M_d, \\ \frac{J_k}{i_t} \ddot{\varphi}_k - \frac{C_t}{i_t^2}(\varphi_d - \varphi_k) - \frac{K_t}{i_t^2}(\dot{\varphi}_d - \dot{\varphi}_k) + \\ \frac{C_{sh}}{i_t^2}(\varphi_k - \varphi_m) + \frac{K_{sh}}{i_t^2}(\dot{\varphi}_k - \dot{\varphi}_m) &= -\frac{M_f}{i_t}, \\ \frac{J_m}{i_t} \ddot{\varphi}_m - \frac{C_{sh}}{i_t^2}(\varphi_k - \varphi_m) - \frac{K_{sh}}{i_t^2}(\dot{\varphi}_k - \dot{\varphi}_m) &= 0.\end{aligned} \right\} (8)$$

Момент сопротивления качению M_f определяется зависимостью:

$$M_f = f R_z r_k,$$

где f – коэффициент сопротивления качению, соответствующий рассматриваемым условиям движения.

Момент сопротивления качению действует только при вращении колеса J_k . Последнее возможно, если момент, скручивающий шину M_k , больше момента сопротивления качению, т. е.:

$$M_f = \begin{cases} 0, & \text{если } M_k \leq M_f, \\ M_f, & \text{если } M_k > M_f. \end{cases}$$

Момент M_k , закручивающий шину, не может быть больше момента по сцеплению ведущих колес с опорной поверхностью ($M_k \leq M_\phi$):

$$M_k = \begin{cases} M_k, & \text{если } M_k < M_\phi, \\ M_\phi, & \text{если } M_k \geq M_\phi. \end{cases}$$

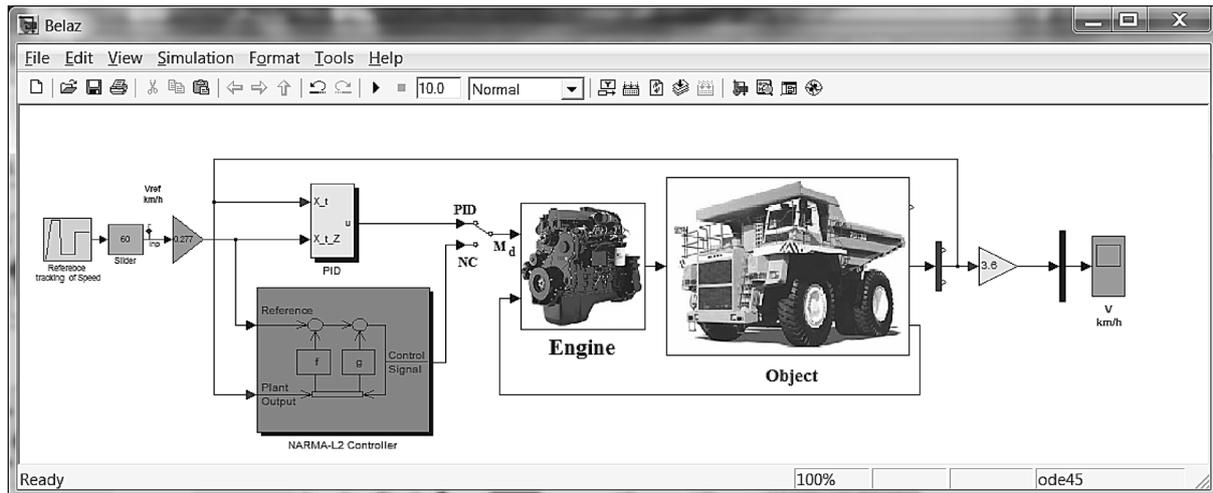


Рис. 4. Компьютерная модель вычислительного эксперимента

Параметры тангенциальной жесткости C_{sh} и тангенциального демпфирования K_{sh} принимают нулевые значения при отрыве колес от опорной поверхности:

$$C_{sh} = \begin{cases} C_{sh}, & \text{если } \delta_k(t) < \delta_c, \\ 0, & \text{в других случаях} \end{cases}$$

$$K_{sh} = \begin{cases} K_{sh}, & \text{если } \delta_k(t) < \delta_c, \\ 0, & \text{в других случаях,} \end{cases}$$

где δ_c – статический прогиб шины.

Имитационная модель управления скоростью движения мобильной машины

В соответствие с принятой расчетной схемой динамики мобильной машины (см. рис. 3), ее математической моделью в виде системы дифференциальных уравнений (8), структурой НС (см. рис. 1), поддерживающей управление динамическим объектом, была построена компьютерная модель в среде Matlab-Simulink, показанная на рис. 4.

Управление поступательной скоростью движения большегрузной машины реализовано на основе контура с обратной отрицательной связью. Закон управления движением обеспечивает один из контроллеров (PID-контроллер или НС-нейроконтроллер NARMA-L2), подключаемых с помощью переключателя. Желаемое изменение скорости движения задается соответствующими блоками формирования входного сигнала. Контроллер формирует крутящий момент двигателя M_d , за счет энергии которого движется машина. Данная компьютерная модель позволяет наблюдать переход-

ные процессы по достижению машиной желаемой скорости курсового движения.

Параметры математической модели (8), принятые в расчетах, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Исходные значения параметров модели машины

Обозначение	Значение	Ед. измерения	Обозначение	Значение	Ед. измерения
m_m	42500	кг	f	0,02	
J_d	2,74	кг·м ²	j	0,8	
C_t	1459000	н·м/рад	r_k	0,908	м
K_t	1000	н·м·с/рад	i_t	64,8	
J_k	610	кг·м ²	C_{sh}	1000000	н·м/рад
δ_c	0,1	м	K_{sh}	100000	н·м·с/рад

Параметры, необходимые для построения нейроконтроллера NARMA-L2 по модели (4), приведены в табл. 2.

Таблица 2. Параметры для моделирования нейроконтроллера

Наименование параметра	Значение
Число нейронов скрытого слоя	7
Шаг дискретизации временных отсчетов, с	0,001
Число задержек времени на входе модели	2
Число задержек времени на выходе модели	1
Диапазон нормирования обучающих данных	[0 1]
Длина обучающей выборки	30000
Максимальное значение входного сигнала, н·м	1500
Минимальное значение входного сигнала, н·м	0
Максимальный интервал идентификации, с	10
Минимальный интервал идентификации, с	5
Количество циклов обучения	300

Модель PID – контроллера, используемая для получения сравнительных данных результатов вычислительного эксперимента, имеет вид:

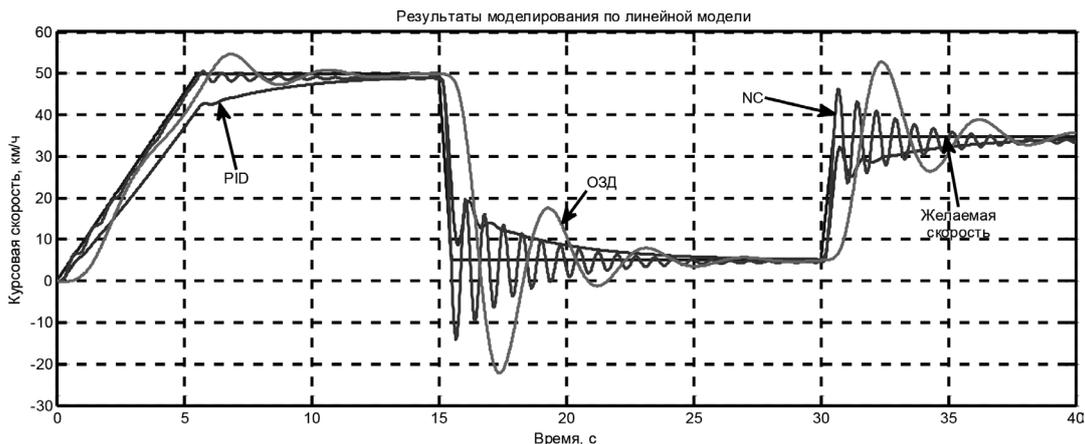


Рис. 5. Диаграмма переходных процессов при изменении скоростных режимов машины

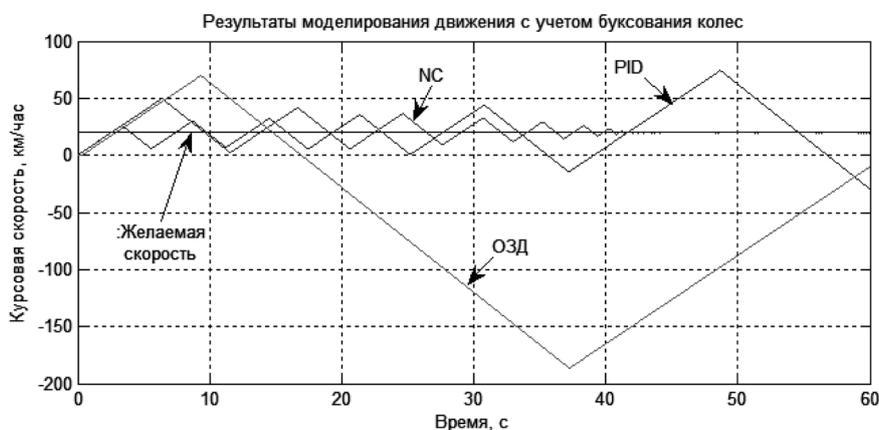


Рис. 6. Диаграмма переходных процессов с учетом буксования колес

$$M_d(t) = 60[V_{ref}(t) - V(t)] + 30 \int_0^t [V_{ref}(t) - V(t)] dt,$$

где $V_{ref}(t)$ – заданная (желаемая) скорость машины, $V(t)$ – текущая скорость машины.

Результаты моделирования

Ниже на рис. 5 представлены графики изменения курсовой скорости большегрузной мобильной машины, характеризующие качественную и количественную стороны переходных процессов, обусловленные формированием управляющих воздействий рассматриваемыми контроллерами.

Для полноты исследования также приведена реакция системы от управления контроллером, построенным на основе эталонной модели с использованием принципов решения обратных задач динамики (ОЗД) [1]. Приведенные на рис. 5 кривые, получены в предположении, что отсутствует буксование колес машины, т. е. динамические процессы соответствуют линейной модели мобильной машины.

Как видно, на обработку желаемой скорости движения (достижение установившегося значения) PID-контроллеру и контроллеру на основе ОЗД требуется около 15 с. И при этом, при работе второго контроллера наблюдается значительное перерегулирование и колебательность переходного процесса.

NC-контроллер, с синтезированной выше динамической нейронной сетью, и заданными параметрами обучающей выборки, более чем на порядок превосходит по быстродействию оба упоминаемые контроллеры и, при этом, имеет весьма хорошие показатели по точности, несмотря на имеющийся незначительный уровень высокочастотных колебаний управляемой переменной.

При описании математической модели отмечалось также возможность учета буксования колес вследствие недостаточного сцепления с дорогой. Это явление вносит в систему уравнений (8) нелинейность. На рис. 6 приведены результаты, отражающие работу рассматриваемых контроллеров в таких условиях кур-

сового движения мобильной машины. Видно, что только контроллер на основе искусственной нейронной сети позволяет достичь машинной заданной скорости движения. Управление скоростью движения двумя другими рассматриваемыми контроллерами не приводит систему к желаемому результату (процесс расходится).

Заключение

Приведенная модель нейроконтроллера на основе авторегрессии со скользящим средним позволяет повысить быстродействие системы с сохранением достаточной точности при переходных процессах. Следует также отметить, что, как показали проведенные компьютерные

исследования на описанной модели мобильной машины, классическими регуляторами сложно, а в отдельных случаях и невозможно, получить требуемые результаты. Кроме этого, модель нейроконтроллера может использоваться при управлении мобильными объектами в изменившихся условиях среды эксплуатации и при изменении параметров самих объектов после дополнительного обучения. Представленные модели применимы для управления другими динамическими объектами. Приведенная модель мобильной машины может быть дополнена уравнениями, описывающими пространственные параметры и характеристики, а также уравнениями, учитывающими движение по криволинейной траектории.

Литература

1. Хайкин, С. Нейронные сети / С. Хайкин. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1104 с.
2. Медведев, В. С. Нейронные сети. MATLAB 6 / В. С. Медведев, В. Г. Потемкин. – М.: ДИАЛОГ–МИФИ, 2002. – 496 с.
3. Крутько, П. Д. Обратные задачи динамики в теории автоматического управления / П. Д. Крутько. – М.: Машиностроение, 2004. – 576 с.
4. Гурский, Н. Н. Виртуальное проектирование ходовой части мобильных машин: монография / Н. Н. Гурский, Ан. М. Захарик, Ал. М. Захарик. – Минск: БНТУ, 2010. – 174 с.