

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО РОБОТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА ФИТОМОНИТОРИНГА В ТЕПЛИЦЕ

*Виталий Лысенко, Игорь Болбот, Игорь Чернов*

*Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины  
ул. Героев обороны 15, Киев, Украина. E-mail: igor-bolbot@ukr.net*

*Vitaliy Lysenko, Igor Bolbot, Igor Chernov*

*National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine  
st. Geroev oborony 15, Kiev, Ukraina. E-mail: igor-bolbot@ukr.net*

**Аннотация.** Для навигации электротехнического роботизированного комплекса фитомониторинга в пространстве теплицы вне технологических направляющих необходимо учитывать влияние различных возмущений на угловую скорость (свойства покрытия пола, препятствия). Изучение характера движения электротехнического роботизированного комплекса фитомониторинга (далее робот) в теплице в моменты маневрирования и заезда на межрядные технологические направляющие, что требует постоянной настройки регулятора угловой скорости при наличии различных возмущений. Исходя из этих требований оправдано создание модели движения робота, которая сможет учесть линейную и угловую скорости, а так же моменты сопротивления поворотам при маневрировании. Модель реализовано в среде MathlabSimulink, получено переходные характеристики по каналам линейной и угловой скоростей при различных управляющих воздействиях. Выявлен нелинейный характер влияния момента сопротивления повороту на переходные процессы. Значения, полученные с помощью модели сравниваются с реальными, которые измерены на прототипе робота с помощью инкрементальных энкодеров. Сравнение этих данных дает возможность говорить о адекватности полученной модели.

**Ключевые слова:** модель динамики, робот, теплица, угловая скорость, линейная скорость.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Практический опыт эксплуатации мехатронных систем позволяет сделать вывод, что ведущие колеса робототехнических платформ имеют различную частоту вращений даже при идентичности используемых двигателей, что затрудняет обеспечение движения робота даже по прямой траектории и локализацию его в пространстве. Эта особенность не позволяет осуществить одновременную настройку оборудования на постоянный оптимальный режим. Поэтому для обеспечения стабилизации скорости вращений колес необходимо определить все факторы, влияющие на движение робота и провести моделирование изменений скорости с учетом этих факторов.

### АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

При исследовании характера движения робота в пространстве теплицы примем следующие допущения. Будем рассматривать робот с колесным типом шасси, наиболее характерным для технологических тележек используемых в тепличном хозяйстве для перевозки продукции как и по межрядным направляющим, так и по остальному пространству тепличного комплекса. Будем также считать, что движение робота при измерении фитометрических и фитоклиматических параметров происходит в горизонтальной плоскости с постоянной скоростью  $v$ . Механизм робота является абсолютно жестким, и отсутствует продольное проскальзывание колес робота. Приводная система робота построена на базе двигателей постоянного тока. Допущение относительно движения в горизонтальной плоскости справедливо для данного робота, так как поверхность пола лишена серьезных неровностей которые могли бы оказать существенное влияния на движение робота. Допущение об отсутствии проскальзывания является более существенным и поэтому при моделировании, оно будет учитываться в модели в виде возмущения по каналам линейной и угловой скоростей.

Уравнения движения робота колесного типа (с разностно-моментным принципом поворота) с учетом его динамических свойств, содержащие фазовый вектор, но без рассмотрения момента сопротивления повороту были представлены в таких работах [1, 3-5, 10-20].

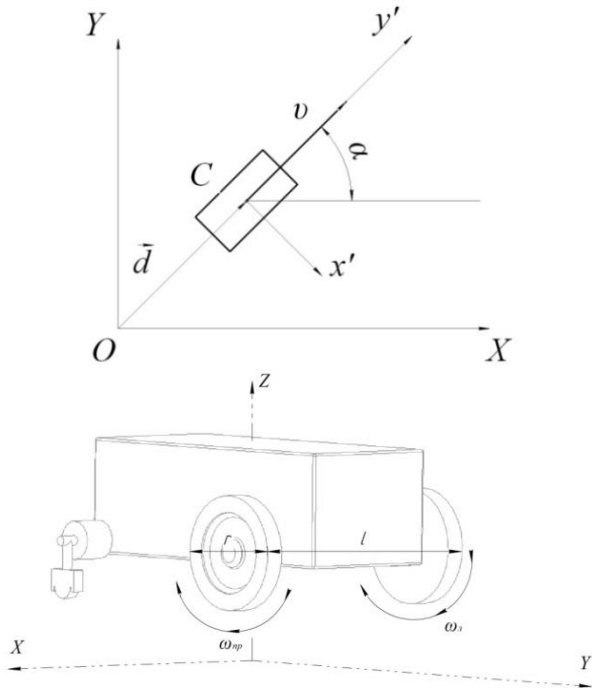
### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Цель исследований – проанализировав факторы, влияющие на перемещения робота в теплице, составить имитационную математическую модель динамики робота и провести проверку ее на адекватность путем сравнения полученных данных с данными реального прототипа.

### ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Положение платформы робота в абсолютной декартовой системе координат  $OXY$  определяется

вектором  $d$  координат центра масс  $C$  и углом ориентации  $\alpha$  (рис. 1) [1].



**Рис. 1.** Платформа робота в абсолютной системе координат  $OXY$

**Fig. 1.** Platform robot in the absolute coordinate system  $OXY$

Кинематические уравнения движения робота в системе координат  $OXY$  имеют вид:

$$\begin{cases} x = v \cdot \cos \alpha, \\ y = v \cdot \sin \alpha, \\ \omega = \dot{\alpha}. \end{cases} \quad (1)$$

При отсутствии проскальзывания скорость линейного перемещения центра масс робота определяется из соотношения:

$$v = \frac{\omega_l + \omega_{np}}{2} \cdot r, \quad (2)$$

где:  $\omega_l, \omega_{np}$  – угловые скорости вращения левого и правого ведущего колеса,  $r$  – радиус колеса.

Угловая скорость робота  $\omega$  в свою очередь определяется выражением 3 (считаем, что правое колесо забегающее, а левое – отстающее, в этом случае положительным направлением угловой скорости считается направление против часовой стрелки):

$$v = \frac{\omega_l + \omega_{np}}{2l} \cdot l, \quad (3)$$

где:  $2l$  – колея робота (расстояние между колесами робота).

Учтем также, что исполнительная система робота, представляет собой два электромеханических привода на базе двигателей постоянного тока, каждый из которых через редуктор приводит в движение ведущие левое и правое колеса и движение робота проходит без проскальзывания.

Уравнения движения робота колесного типа с разностно-моментным принципом поворота [2] с

учетом его динамических свойств [3], содержащих фазовый вектор  $(v, \omega)$ , учитывающие неголономную связь [4] и дополнительный момент сопротивления повороту, имеют вид 4:

$$\begin{cases} m \cdot \dot{v} - m \cdot a \cdot \omega^2 = F_{\text{дв}} - F_{\text{ск}} \\ J \cdot \dot{\omega} + m \cdot a \cdot v \cdot \omega = M_{\text{дв}} - M_c \end{cases}, \quad (4)$$

где:  $m$  – масса робота,  $a$  – координата центра массы робота, которая лежит на оси симметрии робота относительно начала подвижной системы координат,  $F_{\text{дв}}$  – движущая сила,  $F_{\text{ск}}$  – сила противодействия качению,  $M_{\text{дв}}$  – крутящий момент,  $M_c$  – момент сопротивления повороту,  $J$  – момент инерции робота.

Свяжем подвижную систему координат с центром масс робота и используем предположение, что движение робота происходит без проскальзывания, тогда  $a = 0$ , и система (4) принимает такой вид:

$$\begin{cases} m \cdot \dot{v} = F_{\text{дв}} - F_{\text{ск}} \\ J \cdot \dot{\omega} = M_{\text{дв}} - M_c \end{cases}. \quad (5)$$

Определяем  $F_{\text{дв}}$  и  $M_{\text{дв}}$  из уравнения математической модели, описывающей связь между током, напряжением и частотой вращения для двигателя постоянного тока:

$$L \frac{di}{dt} + R \cdot i = U - K_{\omega} \cdot \omega_k \cdot i, \quad (6)$$

где:  $U$  – напряжение питания (управляющее воздействие),  $I$  – ток якоря,  $\omega_k$  – угловая скорость вращения ведущего колеса (рад/с),  $i$  – передаточное число редуктора,  $K_{\omega}$  – коэффициент противо-ЭДС,  $L, R$  – индуктивность якоря двигателя и его активное сопротивление соответственно.

Из выражений (2) и (3) определим  $\omega_k$  и подставим его в выражение (6). Тогда для левого ведущего колеса (отстающего) уравнение (6) приводится к виду:

$$L \frac{di_l}{dt} + R \cdot i_l = U_l - \frac{K_{\omega} \cdot i}{r} \cdot (v \cdot l \cdot \omega), \quad (7)$$

а для правого:

$$L \frac{di_{np}}{dt} + R \cdot i_{np} = U_{np} - \frac{K_{\omega} \cdot i}{r} \cdot (v \cdot l \cdot \omega). \quad (8)$$

Примем предположение [3], что изменение момента как управляющего воздействия, является не-

значительным  $\frac{dl}{dt} = 0$ , и из выражений (7) и (8) вы-

ведем значения тока для каждого из двигателей:

$$i_l = \frac{U_l}{R} - \frac{K_{\omega} \cdot i}{r \cdot R} \cdot (v \cdot l \cdot \omega), \quad (9)$$

$$i_{np} = \frac{U_{np}}{R} - \frac{K_{\omega} \cdot i}{r \cdot R} \cdot (v \cdot l \cdot \omega).$$

$$\text{Тогда, } F_{\text{дв}} = i_l + i_{np} \frac{K_M i}{r}, M_{\text{дв}} = (i_{np} - i_l) \frac{K_M i}{r} l,$$

где:  $K_M = \frac{M_{\text{дв}}}{l}$  – коэффициент пропорциональности тока якоря и момента двигателя. С учетом выражения (9) система уравнений (5) принимает вид:

$$\begin{cases} \frac{m \cdot r^2 \cdot R}{2 \cdot K_{\omega} \cdot K_M \cdot i^2} \cdot \dot{v} + v = \frac{r}{2 \cdot K_{\omega} \cdot i} \cdot (U_{np} + U_{\omega}) - \frac{r^2 \cdot R}{2 \cdot K_{\omega} \cdot K_M \cdot i^2} \cdot F_{ck} \\ \frac{1 \cdot r^2 \cdot R}{2 \cdot K_{\omega} \cdot K_M \cdot i^2 \cdot l^2} \cdot \dot{\omega} + \omega = \frac{r}{2 \cdot K_{\omega} \cdot i \cdot l} \cdot (U_{np} - U_{\omega}) - \frac{r^2 \cdot R}{2 \cdot K_{\omega} \cdot K_M \cdot i^2 \cdot l^2} \cdot M_c \end{cases} \quad (10)$$

Вводим обозначения:  $2l = B$ ,  $T_v = \frac{m \cdot r^2 \cdot R}{2 \cdot K_{\omega} \cdot K_M \cdot i^2}$ ,

$$K'_v = \frac{r}{2 \cdot K_{\omega} \cdot i}, \quad T_{\Omega} = \frac{2Jr^2R}{K_{\omega}K_M i^2 B^2}, \quad K_{\Omega} = \frac{r}{K_{\omega}i B},$$

$$K_{fv} = \frac{r^2 R}{2K_{\omega}K_M i^2}, \quad K_{f\Omega} = \frac{2r^2 R}{2K_M i^2 B^2}.$$

С учетом указанной систему уравнений (10) можно записать в виде:

$$\begin{cases} T_v \cdot \dot{v} + v = K'_v \cdot (U_{np} + U_{\omega}) - K_{fv} \cdot F_{ck} \\ T_{\Omega} \cdot \dot{\omega} + \omega = K'_{\Omega} \cdot (U_{np} - U_{\omega}) - K_{f\Omega} \cdot M_c \end{cases} \quad (11)$$

Управляющие напряжения  $U_{np}$  и  $U_{\omega}$ , подаваемых на приводы ведущих колес (правого и левого соответственно), формируется как:

$$\begin{cases} U_{np} = U_{лин} + U_{\omega} \\ U_{\omega} = U_{лин} - U_{\omega} \end{cases} \quad (12)$$

где:  $U_{лин}$  – напряжение, обеспечивает линейную скорость перемещения робота,  $U_{\omega}$  – напряжение, управляющая угловой скоростью движения робота.

Учитывая (12) система (11) принимает вид:

$$\begin{cases} T_v \cdot \dot{v} + v = K_v \cdot U_{лин} - K_{fv} \cdot F_{ck} \\ T_{\Omega} \cdot \dot{\omega} + \omega = K_{\Omega} \cdot U_{\omega} - K_{f\Omega} \cdot M_c \end{cases} \quad (13)$$

где:  $K_v = 2K'_v$ ,  $K_{\Omega} = 2K'_{\Omega}$ .

В полученной системе уравнений силу сопротивления качению  $F_{ck}$  и момент сопротивления повороту  $M_c$  можно рассматривать как возмущающие действия, а коэффициенты  $K_{fv}$  и  $K_{f\Omega}$  как коэффициенты передачи по возмущающего действия [5].

Сила сопротивления качению определяется как:

$$F_{ck} = f \cdot m \cdot g, \quad (14)$$

где:  $f$  – коэффициент трения качения,  $g$  – ускорение свободного падения. В большинстве случаев при моделировании движения робота значением силы сопротивления качению можно пренебречь из-за малых значение  $f$  и  $K_{fv}$ .

При выполнении маневров для объезда препятствий в условиях ограниченного пространства более существенное влияние имеет возмущающая действие  $M_c$  (особенно при движении робота по нелинейным траекториям). Для роботов с неповоротными ведущими колесами используют выражение для гусеничных платформ [6]:

$$M_c = \frac{\mu \cdot m \cdot g \cdot L}{4}, \quad (15)$$

где:  $\mu$  – коэффициент сопротивления повороту, который зависит от радиуса поворота,  $L$  – длина следа колеса.

Коэффициент сопротивления повороту рассчитывается по эмпирической формуле, которая была получена А.А. Никитиным, основываясь на большом количестве опытов [7]:

$$\mu = \frac{\mu_{max}}{c + (1-c) \cdot \frac{R_n}{2 \cdot l}}, \quad (16)$$

где:  $R_n$  – радиус поворота для забегаящего колеса;  $c$  – эмпирический коэффициент, принимаемый в расчетах равным в среднем 0,85;  $\mu_{max}$  – максимальный коэффициент сопротивления поворота, который зависит от свойств поверхности.

С увеличением радиуса поворота  $R_n$  момент сопротивления повороту значительно уменьшается, о чем свидетельствует выражение (15). Таким образом получено описание основных сил и моментов, влияющих на движение платформы робота.

Заменяя в выражении (13) производные оператором Лапласа  $s$  и учитывая характер влияния  $F_{ck}$  и  $M_c$ , математическую модель динамики движения платформы робота можно выразить в виде имитационной модели (рис. 2), выполненная в среде Matlab Simulink.

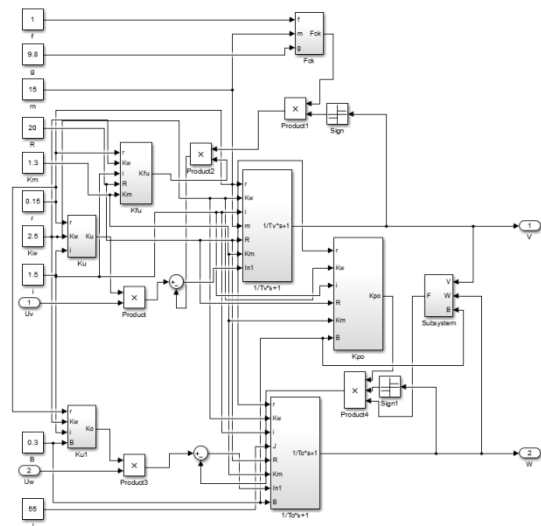


Рис. 2. Имитационная модель динамики движения робота

Fig. 2. A simulation model of the dynamics of the robot

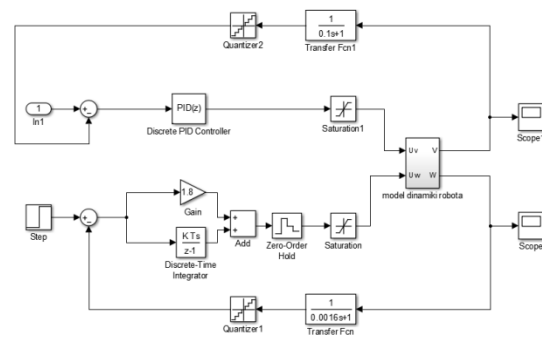


Рис. 3. Имитационная модель цифровой подсистемы управления исполнительного уровня, выполненная в среде Matlab Simulink

Fig. 3. Simulation model digital control subsystem executive level, made in an environment Matlab Simulink

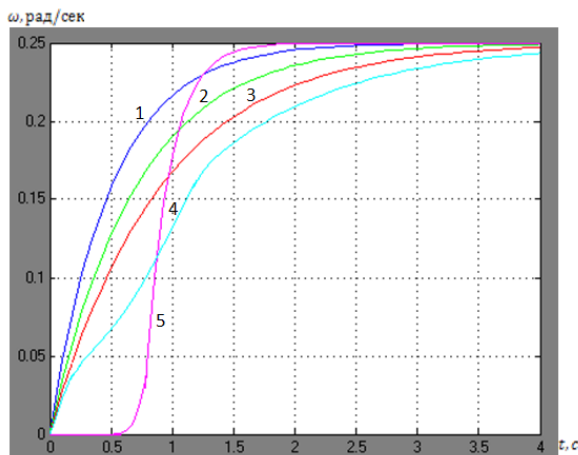
Модель динамики движения является двух-канальной линейной (канал линейной скорости и канал угловой скорости) с нелинейной зависимостью возмущения (момента сопротивления повороту), действующий для канала угловой скорости. Коэффициенты модели соответствуют реальным измеренным показателям робота, а их обозначения - обозначением в выражениях (9, 10, 12, 13).

Для оценки качества управления используем время переходного процесса  $t_{n.n.}$  и перерегулирования  $\sigma$ . Для выбора типа регулятора и его настроек могут быть использованы различные алгоритмы с определением критериев максимальной устойчивости, интегральной квадратичной качества [16], и т.д.

Для получения заданного характера переходного процесса в канале управления угловой скоростью выбран ПИ-закон управления. Тогда, структурную схему цифровой управляющей подсистемы исполнительного уровня можно представить на (рис. 3).

На рисунке представлено подключение имитационной модели динамики движения к цифровым ПИ регуляторам линейной и угловой скорости соответственно, и обратные связи с помощью передаточных функций инкрементальных энкодеров.

На рис. 4 и 5 представлены графики переходного процесса для канала управления угловой скоростью при изменении управляющего воздействия для преодоления  $M_c$ , который определяется по выражению 13.



**Рис. 4.** Переходный процесс для канала управления угловой скоростью поворота при различных линейных скоростях движения центра масс робота

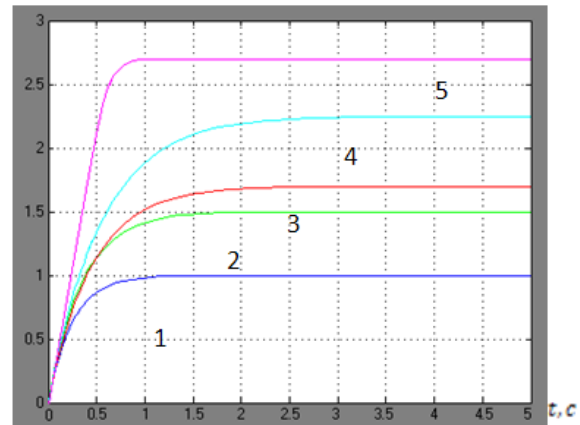
**Fig. 4.** The transition process for the control channel angular velocity of rotation at different linear velocities of the center of mass of the robot

Из приведенного графика видно, что время переходного процесса при изменении радиуса поворота меняется незначительно. Но с уменьшением радиуса поворота, или при увеличении линейной скорости (графики 1-3) возникает отклонение переходного процесса от желаемого, что вызвано необходимостью преодоления момента сопротивления повороту. Для радиуса разворота меньше 0,2 м. (График 4) характерно возникновение точки перегиба, после которой переходный процесс соответствует желаемому. При развороте на месте (график 5), когда мо-

мент сопротивления повороту достигает пика, наблюдается запаздывание переходного процесса после которого быстрый выход на заданное значение угловой скорости.

Когда момент сопротивления преодолен график изменения управляющего воздействия становится близким к желаемому, как и в случаях 1-4.

U, В



**Рис. 5.** Управляющее воздействие для канала управления угловой скоростью поворота робота при различных линейных скоростях движения центра масс робота (1 –  $v = 0,5$  м/с (радиус поворота – 1,3 м), 2 –  $v = 0,25$  м/с (радиус поворота – 0,8 м), 3 –  $v = 0,1$  м/с (радиус поворота – 0,4 м), 4 –  $v = 0,05$  м/с (радиус поворота 0,2 м), 5 –  $v = 0$  м/с, (разворот))

**Fig. 5.** The control action for the control channel angular velocity of rotation of the robot in various linear velocity of the center of mass of the robot (1 –  $v = 0,5$  m/s (the turning radius – 1,3 m); 2 –  $v = 0,25$  m/s (the turning radius – 0,8 m); 3 –  $v = 0,1$  m/s (the radius of rotation of 0,4 m); 4 –  $v = 0,05$  m/s (turning radius of 0,2 m); 5 m/s = 0 m/s (spread))

Из рис. 5 ( $v = 0,5$  м/с (радиус поворота – 1,3 м),  $v = 0,25$  м/с (радиус поворота – 0,8 м),  $v = 0,1$  м/с (радиус поворота – 0,4 м),  $v = 0,05$  м/с (радиус поворота 0,2 м),  $v = 0$  м/с, (разворот)) видим накопления линейной составляющей сигнала управления скоростью до точки пока не преодолен момент сопротивления повороту (график 5 - прямой отрезок).

Для дальнейшего использования построенной модели в создании программного обеспечения робота необходимо провести проверку ее на адекватность. При этом необходимо сравнить результаты расчета по модели и экспериментальные измерения угловой скорости робота при его движении на реальной поверхности. Так как изменение угловой скорости зависит от режима движения робота поэтому необходимо испытать модель как минимум в 2-х режимах: при значении  $v = 0,5$  м/с (радиус поворота – 1,3 м), который является основным режимом движения при перемещении в теплице при отсутствии препятствий и при значении  $v = 0$  м/с, разворот робота на месте при появлении препятствия впереди.

Для измерения скорости вращения колес робота использованы инкрементальные энкодеры, фик-

сирующие изменение положения колеса относительно зафиксированного датчика (рис. 6).

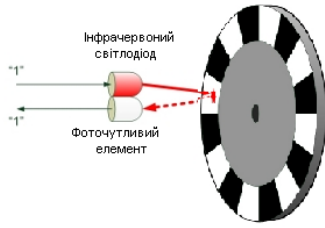


Рис. 6. Измерение угловой скорости с помощью инкрементального энкодера

Fig. 6. The measurement of the angular velocity using incremental encoder

Измерив реальное изменение угловой скорости робота во времени, в двух режимах линейной скорости сравниваем полученные значения с соответствующими значениями полученными путем расчета по модели (табл. 1).

Таблица 1. Сравнение значений угловой скорости робота полученной экспериментально и по модели

Table 1. Comparison of the angular velocity of the robot obtained experimentally and by model

Время измерения, сек.	Первый опыт (при $v = 0,5$ м/с)		Второй опыт (при $v = 0$ м/с)	
	Экспериментальные данные, рад/с	Данные по модели, рад/с	Экспериментальные данные, рад/с	Данные по модели, рад/с
0	0	0	0	0
0.13	0.027	0.0295	0	0
0.325	0.064	0.695	0	0
0.525	0.095	0.102	0.035	0.03
0.725	0.121	0.129	0.170	0.159
0.925	0.142	0.152	0.219	0.208
1.125	0.16	0.168	0.244	0.238
1.325	0.175	0.183	0.246	0.240
1.525	0.188	0.195	0.248	0.246
...	...	...	...	...
6.54	0.25	0.25	0.25	0.25

Основываясь на данных табл. 1 можно построить графики изменения угловой скорости во времени двух режимах: 1)  $v = 0,5$  м/с (радиус поворота – 1.3 м); 2)  $v = 0$  м/с, (разворот) (рис. 7.).

Для оценки адекватности разработанной математической модели, применялись следующие показатели:

Среднее значение всех измерений в опыте (16):

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^{20} Y_i}{n}, \quad (17)$$

где:  $n$  – количество наблюдений;  $i$  – номер наблюдения.

Дисперсия воспроизведения:

$$S_{vid} = \frac{\sum_{i=1}^{20} (Y_i - \bar{Y})^2}{n_0 - 1}, \quad (18)$$

где:  $n_0 - 1$  – число степеней свободы, равное числу опытов минус единица.

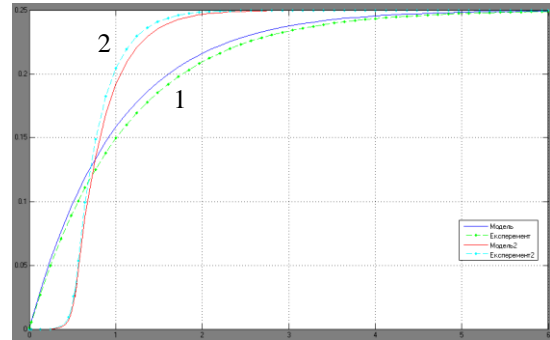


Рис. 7. Сравнение результатов расчетов угловой скорости по модели и экспериментальных данных.

Fig. 7. Comparing results of calculations of the angular velocity model and experimental data.

В расчетах величину доверительной вероятности принимали  $P = 0.95$ , соответствующей ошибке в пределах  $\pm 3S$ . Разработанную математическую модель проверяли на адекватность по критерию Фишера, для этого определяли дисперсию адекватности:

$$S_{Ad}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\bar{Y}_{iE} - Y_T)^2}{f}, \quad (19)$$

где:  $f$  – число степеней свободы дисперсии адекватности;  $\bar{Y}_{iE}$  – среднее значение отклика в  $i$ -м опыте;  $Y_T$  – значения отклика в  $i$ -й точке, вычисленное по модели;

$$F = S_{ad}^2 / S_{vid}^2. \quad (20)$$

Расчитано по выражению (20) значение критерия Фишера меньше критического  $F_p < F_m = 5$ , что говорит об адекватности модели. Погрешность модели составляет не более 5% от общего показателя угловой скорости робота.

## ВЫВОДЫ

1. Разработана математическая модель движения тепличного робота и обоснована возможность его использования при создании системы управления таким роботом. При этом сделаны следующие предположения: движение робота осуществляется в горизонтальной плоскости; механизм работа абсолютно жестким; отсутствует проскальзывание.

2. Анализируя результаты моделирования выявлено нелинейный характер влияния момента сопротивления повороту на переходный процесс изменения угловой скорости робота, учитывая, что с увеличением радиуса поворота влияние момента сопротивления уменьшается, поэтому модель нельзя аппроксимировать апериодическим звеном первого порядка, не потеряв при этом необходимую для

практического использования точность моделирования.

3. Модель прошла проверку на адекватность путем сравнения полученных данных с экспериментальными по методу Фишера. Значение рассчитанной погрешности не превышает 5% от общей угловой скорости работа, подтверждает адекватность модели и удовлетворяет технологическим требованиям.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Бурдаков С.Ф., Мирошник И.В., Стельмаков Р.Э. 2001.** Системы управления колесных роботов. – СПб: Наука. 227.
2. **Зенкевич С.Л., Назарова А.В. 2006.** Система управления мобильного робота // Вестник МГТУ. серия «Приборостроение», №3. – 31-51.
3. **СвеЛиннХтуАунг. 2011.** Навигация и управление движением мобильного робота в городских условиях / автореф. канд. техн. наук. – М. 16.
4. **Мартыненко Ю.Г. 2005.** Управление движением мобильных колесных роботов // Фундаментальная и прикладная математика, Т. 11. – №8. 29-80.
5. **Ганькин Ю.А. 1975.** Системы автоматического вождения машинно-тракторных агрегатов. – М.: МАМИ. – 74.
6. **Трояновская И.П. 2010.** О формировании реакций в контакте колеса с фунтом на повороте // Автомобиле- и тракторостроение: приоритеты развития и подготовка кадров материалы 66-й международной науч. конф. АИИ. – М.: МАМИ. – 17-32.
7. **Никитин, А.О. 1975.** К вопросу исследования касательных реакций грунта, действующих на гусеничный движитель в процессе поворота машины/ А.О. Никитин, А.Б. Коняев, В.В. Павлов // сб. науч. тр. МАДИ. – М., вып. 109. – 71-80.
8. **Sezgin Uzun. 2007.** The Effect of Temperature and Mean Cumulative Daily Light Intensity on Fruiting Behavior of Greenhouse-grown Tomato: [Елек-трон. ресурс]. The University of OndokuzMayıs, Faculty of Agriculture, Department of Horticulture. 132(4). – p. 459–466. – Режим доступа: до журн.: <<http://journal.ashspublications.org/content/132/4/459.full.pdf>>.
9. **Igor Bolbot. 2013.** Mathematical model influence of thermal regime on growth and yield of tomato plants in system of soil-plant-air: [Елек-трон. ресурс]. National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. 15. – 153-158.
10. **Евстигнеев Д.В. 2010.** Моделирование роботов и транспортных средств [Электронный ресурс] // URL: <<http://dynsofL.ru/mrmodeling.php>>.
11. **Литинский С.А. 1966.** Автоматизация вождения самоходных машин (автоводители). М. – Л.: Энергия, – 144.
12. **Опрышко А. 2012.** Робототехнические системы для городских тепличных хозяйств / А. Опрышко, Н. Пасичник // Motrol, Lublin. Том 14. №3. – 222–223.
13. **Тарасов В.Б., Калуцкая А.П. 2010.** Моделирование взаимодействия робота с внешней средой на основе пространственных логик и распространения ограничений // Программные продукты и системы. № 2. – 16-17.
14. **Градецкий В.Г. 2001.** Управляемое движение мобильных роботов по произвольно-ориентированному в пространстве поверхностям. – М.: Наука. Гл. 3. – 96-171.
15. **Юревич Е.И. 2005.** Основы робототехники: 2 изд. перераб. и доп. СПб: БХВ-Петербург. 416.
16. **Гудвин Г.К., Гребне С.Ф., 2004.** Сольгадо М.Э. Проектирование системуправления. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. – 911.
17. **Забавников Н.А. 1975.** Основы теории тракторных гусеничных машин. М. Машиностроение, – 320.
18. **Матюхин В.И. 2009.** Управление механическими системами. М.: Физматлит, – 320.
19. **Зенкевич С.Л., Назарова А.В. 2006.** Система управления мобильного робота // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Приборостроение. №3. 31-51.
20. **Батанов А.Ф., Грицынин С.Н., Муркин С.В. 1999.** Робототехнические комплексы для обеспечения специальных операций // Специальная техника. №6. – 35-37

#### MATHEMATICAL MODEL OF DYNAMICS OF MOVEMENT OF ROBOTIC SYSTEMS ELECTRICAL PHYTOMONITORING IN THE GREENHOUSE

**Summary.** To navigate the complex electrical phytomonitoring robotic space technology guide is a greenhouse is necessary to consider the impact of various disturbances on the angular velocity (the properties of the floor covering, obstacles). The study of the nature of complex robotic movement of electrical phytomonitoring (the robot) in a greenhouse maneuvering and arrival points in the process guides that requires constant angular velocity control setting in the presence of various disturbances. Based on these requirements is justified to create a model of the robot, which is able to take into account the linear and angular velocity, as well as the moments of resistance turns when maneuvering. The model is implemented in an environment Matlab Simulink, transient response received on channels of linear and angular velocities at various control actions. It identified non-linear nature of the impact of the steering force on transients. Values obtained by the model are compared to the actual, as measured on a prototype of the robot using incremental encoders. Comparison of these data makes it possible to speak about the adequacy of the resulting model.

**Key words:** model of the dynamics of the robot, greenhouse, angular velocity, linear velocity.