



## Транспортні процеси агропромислового комплексу Transport processes of agro-industrial complex

УДК 631.589.2 (082)

### Методика расчета барабанной подъемной установки

О.М.Черниш, Р.В.Марковський

*Национальный университет биоресурсов  
и природопользования Украины (Киев, Украина)*

*На основе обоснованных гипотез и допущений выведены дифференциальные уравнения динамики однобарабанных подъемных установок с учетом упругости валов и упруго-вязких весомых канатов переменной длины.*

**Ключевые слова:** барабан, динамика, подъём, канат, упругость, уравнение, масса, трение, связь.

**1. Постановка проблемы.** В настоящее время широкое распространение получили башенные гидропонные теплицы и подземные гидропонные цеха.

Башенные гидропонные теплицы достигают значительных высот. Так, вблизи Еревана высота такой теплицы составляет 70 м, а под Ригой – 140 м. Высота гидропонной башни "Солнце" – 82 в Японии – 240 м.

Существующие подземные гидропонные горизонты располагаются на глубине от 200 до 600 метров.

Доставка исходного посевного материала на такие высоты и глубины, а также вывоз выращенного урожая может в данном случае осуществляться только с помощью подъемных установок, которые монтируются на верхних ярусах башен или на поверхности земли. Поэтому необходимо создание обоснованной инженерной методики расчета указанных установок с целью обоснования их рациональных конструктивно-технологических параметров. Одним из главных этапов на пути создания такой методики есть составление дифференциальных уравнений динамики подъемных установок.

Подъемная установка состоит из подъемной машины с приводом и концевых грузов на канатах. Подъемная машина представляет собой устройство, преобразующее вращение вала двигателя в поступательное движение концевых грузов посредством навивки каната на вращающийся барабан. В настоящее время в странах дальнего зарубежья используются однобарабанные и двухбарабанные подъемные установки.

### **2. Анализ исследований и публикаций по данной проблеме.**

В работе [1] рассматривается динамика двух- и однобарабанных установок.

Тут расчетные схемы представляются в виде многомассовых крутильных систем, при этом массы канатов приводятся к массам концевых грузов, а изменение длины каната не учитывается.

В работе [2] рассматриваются динамические усилия в весоом упруго-вязком канате переменной длины в отрыве от подъемной машины, где взаимное влияние неизбежно.

В работе [3] наиболее четко сформулирована "Вторая основная задача динамики каната переменной длины", однако в дальнейшем исследуются частные задачи динамики каната.

В представленной работе, в отличие от указанных выше, выведены дифференциальные уравнения динамики подъемных установок как единого электромеханического комплекса: машина – канаты – концевые грузы.

### **3. Цель исследований.**

Создание динамической теории расчета однобарабанных подъемных установок гидропонных комплексов на базе дифференциальных уравнений, описывающих динамические процессы во всех упругих элементах подъемной установки как в едином комплексе.

### **4. Вывод дифференциальных уравнений динамики однобарабанной подъемной установки для подземных гидропонных цехов.**

Рассмотрим механическую модель однобарабанной установки, изображенной на рисунке.

К сосредоточенным массам относятся вращающиеся массы (имеющие соответствующие моменты инерции), показанные на рисунке:

ротор  $I_1$ , редуктор  $I_2$ , барабан  $I_3$ , направляющие шкивы  $I_4, I_5$ , а также концевые грузы, обозначенные на рисунке через  $Q_1, Q_2$ .

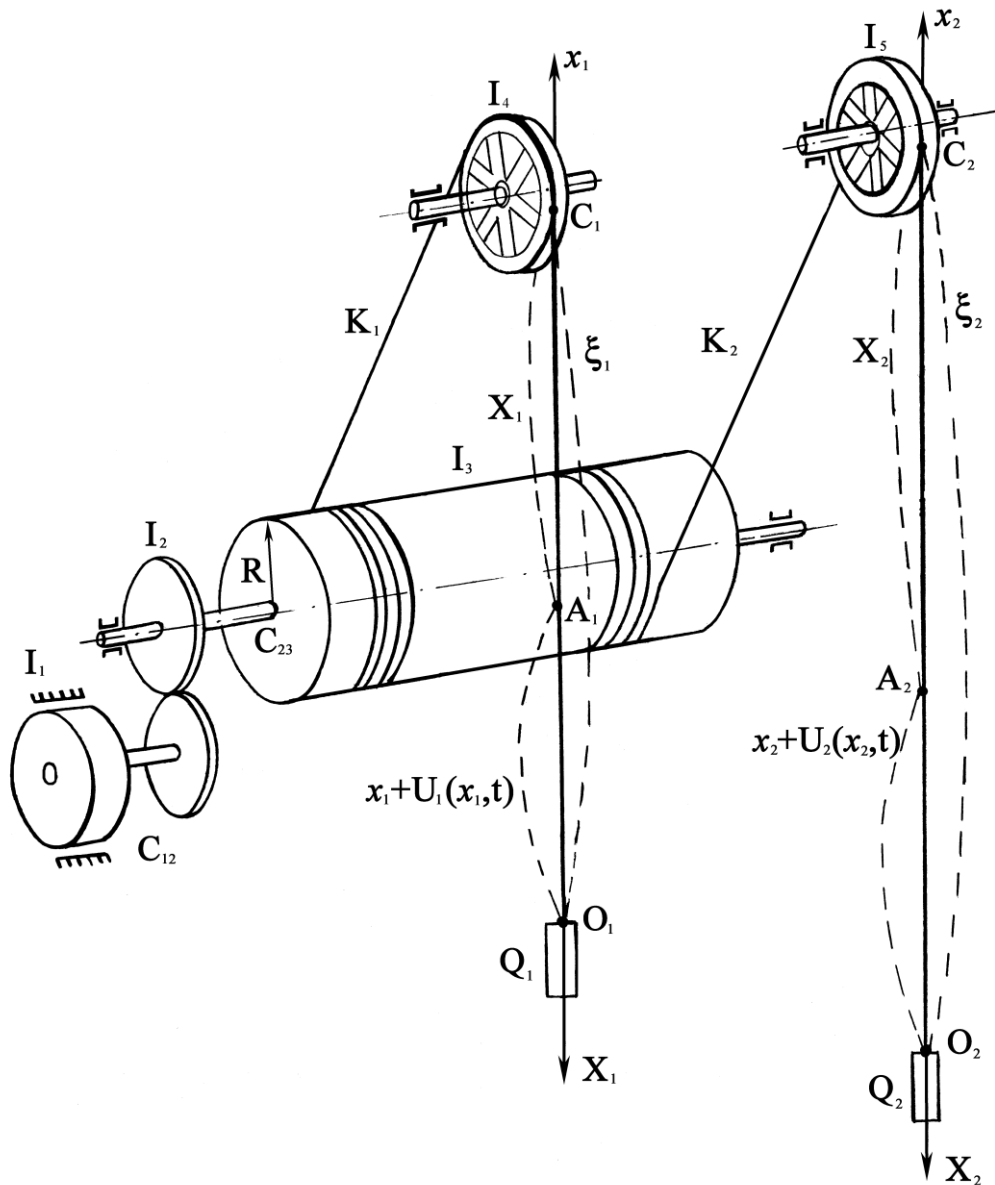


Рис. – Механическая модель и расчетная схема однобарабанной подъемной установки для подземных гидропонных цехов

Маховые массы с моментами инерции  $I_i$  соединены между собой соответственно стационарными связями крутильной и продольной жесткости  $C_{12}, C_{23}, K_1, K_2$ .

Концевые грузы веса  $Q_1$  и  $Q_2$  связаны с барабаном  $I_3$  и направляющими шкивами  $I_4, I_5$  упруго-вязкими нестационарными связями – канатами. К массе  $I_1$  прикладывается момент

электродвигателя  $M_1(t)$ . Крутящий момент от двигателя через вращающиеся массы и упругие связи передается к концевым грузам, в результате чего вся подъемная установка приводится в движение. С барабана  $I_3$  канат свивается, опуская при этом концевой груз  $Q_1$ . Одновременно на указанный барабан навивается вторая ветвь каната, производя подъем груза  $Q_2$ .

Таким образом, подъемная установка работает как бы в маятниковом режиме, поочередно поднимая полезный груз, то одним, то другим канатом.

При выводе дифференциальных уравнений динамики подъемных установок для производства гидроронной продукции будем исходить из следующих основных допущений:

- 1) сосредоточенные массы крупных конструктивных узлов подъемных установок представляют собой абсолютно твердые тела;
- 2) соединения сосредоточенных масс установки – абсолютно упругие невесомые связи с постоянными коэффициентами жесткости;
- 3) внешнее трение и силы аэродинамического сопротивления отсутствуют;
- 4) подъемные канаты переменной длины представляют собой весомые упруго-вязкие нити и являются идеально-гибкими и некрутящимися;
- 5) поперечные колебания канатов отсутствуют;
- 6) канат в точках набегания на барабан и шкивы и схода с барабана и шкивов не проскальзывает относительно навивочной поверхности;
- 7) податливость опор барабана и направляющих шкивов пренебрежимо мала по сравнению с податливостями упругих связей силовой линии подъемной установки.

Отдельно то или иное из перечисленных допущений использовалось различными авторами в частных задачах динамики каната или машины, подтверждены теоретическими или экспериментальными исследованиями [1,2,3].

Вывод указанных дифференциальных уравнений основывается на составлении общего уравнения динамики механической системы.

С этой целью перейдем к выбору систем отсчета и обобщенных координат. Поместим начало осей неподвижной системы координат в точках набегания  $C_2$  и схода  $C_1$  канатов со шкивов. Оси  $C_1X_1$  и  $C_2X_2$  направим вниз по отвесам канатов. Начало осей подвижной системы координат поместим в точках  $O_1$  и  $O_2$  соединения канатов с грузами  $Q_1$  и  $Q_2$  соответственно. Оси  $O_1X_1$  и  $O_2X_2$  направим вверх по канатам. Тогда для произвольных точек сечений канатов  $A_1$  и  $A_2$  будем иметь:

$$\begin{aligned} X_1 &= \xi_1 - x_1 - U_1(x_1, t), \\ X_2 &= \xi_2 - x_2 - U_2(x_2, t), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\xi_1, \xi_2$  – абсолютные координаты точек  $O_1$  и  $O_2$ ;  $x_1, x_2$  – относительные координаты точек  $A_1$  и  $A_2$  для недеформированных канатов;  $U_1, U_2$  – деформация длин частей канатов  $O_1A_1, O_2A_2$ .

Связь между  $\xi_1, \xi_2$  и переменными длинами канатов выразится следующими зависимостями:

$$\begin{aligned} \xi_1 &= l_1(t) + U_1(l_1, t), \\ \xi_2 &= l_2(t) + U_2(l_2, t), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $l_1(t)$  и  $l_2(t)$  – переменные длины канатов в момент времени  $t$  без учета деформации канатов;  $U_1(l_1, t), U_2(l_2, t)$  – деформации канатов длины  $l_1(t)$  и  $l_2(t)$  соответственно.

Будем считать, что в точках набегания каната на барабан и шкив и его схода с барабана и шкива канат не проскальзывает относительно навивочной поверхности. Тогда в точке схода и набегания канатов на шкивы имеют место следующие соотношения:

$$\begin{aligned} \frac{d\xi_1}{dt} &= V_1 + \left. \frac{\partial U_1}{\partial t} \right|_{x_1=l_1}, \\ \frac{d\xi_2}{dt} &= V_2 + \left. \frac{\partial U_2}{\partial t} \right|_{x_2=l_2}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $V_1$  и  $V_2$  – окружные скорости шкивов.

Если обозначить абсолютные углы поворотов соответствующих сосредоточенных масс через  $\varphi_K$  ( $K = 1, 2, \dots, 5$ ), то переменные длины канатов определяются по следующим зависимостям:

$$\begin{aligned} l_1 &= l_{01} + \varphi_4 \cdot r, \\ l_2 &= l_{02} - \varphi_5 \cdot r, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $l_{01}$  и  $l_{02}$  – начальные длины отвесов канатов;  $r$  – радиус шкивов.

В соответствии с зависимостями (1), (2) и (4) можно записать общие выражения:

$$\begin{aligned} X_1 &= X_1(\Phi_1, \Phi_2, l_1, t), \\ X_2 &= X_2(\Phi_3, \Phi_4, l_2, t), \\ \xi_1 &= \xi_1(\Phi_1, \Phi_2, l_1, t), \\ \xi_2 &= \xi_2(\Phi_3, \Phi_4, l_2, t), \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь  $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4$  – неизвестные функции времени в формулах, предложенных Г.Н.Савиным [3], для абсолютного удлинения сечений канатов, которые входят в следующие зависимости:

$$\begin{aligned} U_1 &= X_1\Phi_1 + X_1^2\Phi_2, \\ U_2 &= X_2\Phi_3 + X_2^2\Phi_4. \end{aligned} \quad (6)$$

Принимая  $\varphi_K, X_1, X_2$  за обобщенные координаты, на основании общего уравнения динамики получим следующую систему дифференциальных уравнений динамики однобарабанной подъемной установки для подземных гидроронных цехов:

$$\begin{aligned}
 I_1 \ddot{\varphi}_1 + C_{12}(\varphi_1 - i\varphi_2) &= M_1(t), \\
 I_2 \ddot{\varphi}_2 + C_{23}(\varphi_2 - \varphi_3) - iC_{12}(\varphi_1 - i\varphi_2) &= 0, \\
 I_3 \ddot{\varphi}_3 - C_{23}(\varphi_2 - \varphi_3) + K_1 R(\varphi_3 R - \varphi_4 r) + K_2 R(\varphi_3 R - \varphi_5 r) &= -M_3(t), \\
 I_4 \ddot{\varphi}_4 + K_1 r(\varphi_3 R - \varphi_4 r) &= Q_1 \left[ 1 - \frac{1}{g} (\ddot{i}_1 + \dot{i}_1 \dot{\varphi}_1 + l_1 \ddot{\varphi}_1 + 2l_1 \dot{i}_1 \dot{\varphi}_2 + l_1^2 \ddot{\varphi}_2) \right] r + \\
 + ql_1 \left[ 1 - \frac{1}{g} (\ddot{i}_1 + \dot{i}_1 \dot{\varphi}_1 + \frac{1}{2} l_1 \ddot{\varphi}_1 + 2l_1 \dot{i}_1 \dot{\varphi}_2 + \frac{2}{3} l_1^2 \ddot{\varphi}_2) \right] r, \\
 I_5 \ddot{\varphi}_5 - K_2 r(\varphi_3 R - \varphi_5 r) &= -Q_2 \left[ 1 - \frac{1}{g} (\ddot{i}_2 + \dot{i}_2 \dot{\varphi}_3 + l_2 \ddot{\varphi}_3 + 2l_2 \dot{i}_2 \dot{\varphi}_4 + l_2^2 \ddot{\varphi}_4) \right] r - \\
 - ql_2 \left[ 1 - \frac{1}{g} (\ddot{i}_2 + \dot{i}_2 \dot{\varphi}_3 + \frac{1}{2} l_2 \ddot{\varphi}_3 + 2l_2 \dot{i}_2 \dot{\varphi}_4 + \frac{2}{3} l_2^2 \ddot{\varphi}_4) \right] r, \\
 \frac{l_1}{g} \left( Q_1 + \frac{ql_1}{3} \right) \ddot{\varphi}_1 + \left[ \frac{\dot{l}_1}{g} \left( Q_1 + \frac{ql_1}{2} \right) + \alpha \right] \dot{\varphi}_1 + K \varphi_1 + \frac{l_1^2}{g} \left( Q_1 + \frac{5ql_1}{12} \right) \ddot{\varphi}_2 + \\
 + l_1 \left[ \frac{2}{g} \left( Q_1 + \frac{ql_1}{2} \right) \dot{i}_1 + \alpha \right] \dot{\varphi}_2 + l_1 K \varphi_2 &= \left( Q_1 + \frac{ql_1}{2} \right) \cdot \left( 1 - \frac{\dot{i}_1}{g} \right),
 \end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{l_1}{g} \left( Q_1 + \frac{5ql_1}{12} \right) \ddot{\varphi}_1 + \left[ \frac{\dot{l}_1}{g} \left( Q_1 + \frac{2ql_1}{3} \right) + \alpha \right] \dot{\varphi}_1 + K \varphi_1 + \frac{l_1^2}{g} \left( Q_1 + \frac{8ql_1}{15} \right) \ddot{\varphi}_2 + \\
 + l_1 \left[ \frac{2}{g} \left( Q_1 + \frac{2ql_1}{3} \right) \dot{i}_1 + \frac{4}{3} \alpha \right] \dot{\varphi}_2 + \frac{4}{3} Kl_1 \varphi_2 &= \left( Q_1 + \frac{2ql_1}{3} \right) \left( 1 - \frac{\dot{i}_1}{g} \right), \\
 \frac{l_2}{g} \left( Q_2 + \frac{ql_2}{3} \right) \ddot{\varphi}_3 + \left[ \frac{\dot{l}_2}{g} \left( Q_2 + \frac{ql_2}{3} \right) + \alpha \right] \dot{\varphi}_3 + K \varphi_3 + \frac{l_2^2}{g} \left( Q_2 + \frac{5ql_2}{12} \right) \ddot{\varphi}_4 + \\
 + l_2 \left[ \frac{2}{g} \left( Q_2 + \frac{ql_2}{2} \right) \dot{i}_2 + \alpha \right] \dot{\varphi}_4 + Kl_2 \varphi_4 &= \left( Q_2 + \frac{ql_2}{2} \right) \left( 1 - \frac{\dot{i}_2}{g} \right), \\
 \frac{l_2}{g} \left( Q_2 + \frac{5ql_2}{12} \right) \ddot{\varphi}_3 + \left[ \frac{\dot{l}_2}{g} \left( Q_2 + \frac{2ql_2}{3} \right) + \alpha \right] \dot{\varphi}_3 + K \varphi_3 + \frac{l_2^2}{g} \left( Q_2 + \frac{8ql_2}{15} \right) \ddot{\varphi}_4 + \\
 + l_2 \left[ \frac{2}{g} \left( Q_2 + \frac{2ql_2}{3} \right) \dot{i}_2 + \frac{4}{3} \alpha \right] \dot{\varphi}_4 + \frac{4}{3} Kl_2 \varphi_4 &= \left( Q_2 + \frac{2ql_2}{3} \right) \left( 1 - \frac{\dot{i}_2}{g} \right).
 \end{aligned}$$

К уравнению (7) следует присоединить уравнения нестационарных связей (4).

В полученной системе уравнений:  $i$  – передаточное число редуктора;  $C_{12}, C_{23}, K_1, K_2$  – жесткости соответствующих упругих связей;  $R$  – радиус барабана;  $I_K$  – моменты инерции сосредоточенных масс подъемной установки;  $Q_1, Q_2$  – концевые грузы;  $q$  – вес одного погонного метра каната;  $S_1$  и  $S_2$  – усилия в канатах.

Полученные дифференциальные уравнения динамики подъемной установки могут быть использованы для расчета усилий в канатах и моментов сил упругости в валах барабана при любых режимах работы установки. Это дало воз-

можность научно обосновать конструктивные и кинематические параметры рассматриваемых подъемных установок [4-6].

#### Выводы.

Получена система дифференциальных уравнений динамики подъемных установок как единого электромеханического комплекса. Дальнейшее решение указанной системы дифференциальных уравнений позволит определить как динамические усилия в упруго-вязких канатах переменной длины, так и момент сил упругости в валах установки. Более того, эти уравнения приемлемы для решения задач синтеза подъемных установок других типов.

### Литература

1. Голубенцев А.Н. Динамика переходных процессов в машинах со многими массами. – М.: Машгиз, 1969. – 146 с.
2. Глушко Я.М. Динамические усилия в подъемных канатах переменной длины. – Труды МакНИИ, – 1969.
3. Савин Г.Н., Горошко О.А. Динамика нити переменной длины. – К.: Изд-во АН УССР, 1962. – 426 с.
4. Kostyuchenko V., Bulgakov V., Nowak J. Determination of heat conductivity coefficient in the

production of heat for poultry farms // MOTROL. Motorization And Power Industry in Agriculture. Volume 9. Lublin. Poland, 2007. – pp. 15-21.

5. Kostyuchenko V., Bulgakov V. Problems of manufacturing hydroponics products // MOTROL. Motorization And Power Industry in Agriculture. Volume 9 A. Lublin. Poland, 2007. – pp. 144-149.

6. Патент України № 67149. Пристрій для виробництва гідропонної продукції. Опубл. в бюл. №6, 2004. – Булгаков В.М., Костюченко В.О., Дубінін В.В.

### Анотація

#### Методика розрахунку барабанної підйомної установки

Черниш О.М., Марковський Р.В.

*На основі обґрунтованих гіпотез та допущень отримані диференціальні рівняння динаміки однобарабанних підйомних установок з урахуванням пружності валів та пружно-в'язких вагомих канатів змінної довжини*

**Ключові слова:** барабан, динаміка, підйом, канат, пружність, рівняння, маса, тертя, зв'язки.

### Abstract

#### Method of calculating the drum hoisting plant

O. Chernysh, R. Markovskyi

*On the basis of proved hypotheses and assumptions the differential equations of dynamics of elevating installations are gained due to taking into account shafts power and spring-elastic ropes of variable length.*

**Keywords:** drum, dynamics, lifting, rope, elasticity, equation, mass, friction, connections.

Представлено: В.А.Войтов / Presented by: V.Voytov

Рецензент: А.В.Миняйло / Reviewer: A/Minyaylo

Подано до редакції / Received: 25.08.2013