

УДК 622.276.001 – 83(06)

**В.М. Бочаров, Т.В. Бочарова, В.В. Конопелько,
Ю.П. Сташинов**

**ИССЛЕДОВАНИЕ НА КОМПЬЮТЕРНОЙ
МОДЕЛИ РАБОТЫ ДВУХДВИГАТЕЛЬНОГО
ПРИВОДА СТАНКА-КАЧАЛКИ**

Семинар № 17

В настоящее время при разработке нефтяных месторождений скважинным способом интенсивно внедряется регулируемый асинхронный привод скважинных погружных центробежных насосов. Однако классические штанговые насосы остаются наиболее массовым средством подъема нефти на поверхность. Поэтому вопросы совершенствования привода нефтяных станков качалок являются актуальными.

Станок качалка скважинного насоса (рис. 1) содержит опорную вышку 1, раму привода 2, асинхронный двигатель 3, вал 4, барабан 5, асинхронный двигатель 6, шкивы 7, неподвижную ось 8, шкивы 9-10, подвижную ось 11, канат 12, подвеску насосных штанг 13, наголовник обсадных труб 14, упругие элементы 15, 16, 17.

К верхней части вышки 1 прикреплена рама привода 2, на которой установлены одинаковые асинхронные двигатели 3 и 6, связанные между собой и с барабаном 5 валом 4. Статорные обмотки двигателей 3 и 6 соединены между собой пофазно-последовательно в звезду или треугольник.[1]

Барабан 5 выполнен билиндроконическим симметричным. Его ось симметрии совпадает с осью скважины. По обе стороны от оси симметрии на барабане имеются участки с цилиндрическими и конусными поверхностями, на которых выполнена канавка для укладки каната. На-

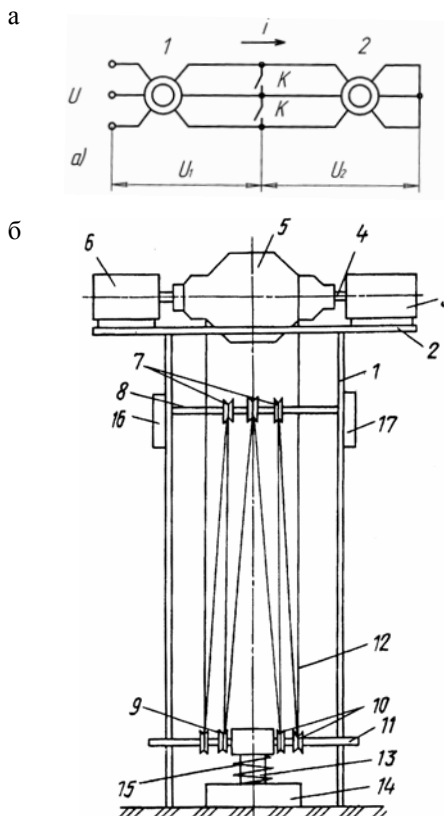


Рис. 1. Схема соединения статорных обмоток двигателей (а) и конструктивная схема (б) станка качалки

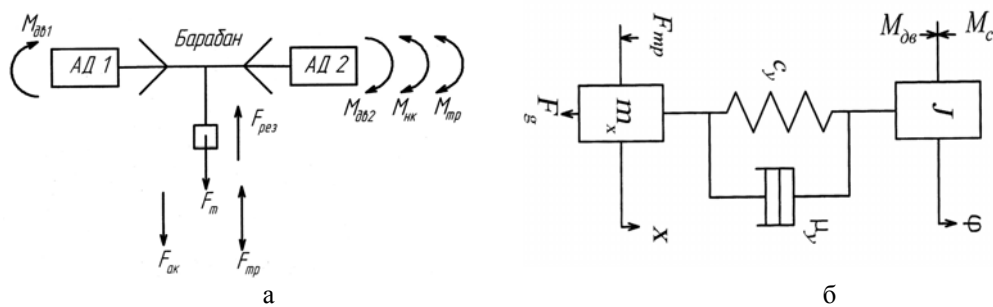


Рис. 2. Принципиальная (а) и динамическая (б) схемы качалки с безредукторным приводом

чало каната 12 присоединено к левому торцу барабана 5, мерная длина его уложена в канавку цилиндрической части. Далее канат проходит через шкивы 7, установленные на жестко закрепленной неподвижной оси 8, и шкивы 9-10, установленные на подвижной относительно вышки 1 оси 11, жестко соединенной с подвеской насосных штанг 13. Вторая мерная длина каната, равная первой, уложена в продолжение канавки барабана 5 с правой стороны от его оси симметрии. Конец каната 12 прикреплен к правому торцу барабана 5. Перемещение подвески насосных штанг 13 ограничено внизу упругим элементом 15, вверху упругими элементами 16 и 17. [2]

С целью изучения возможностей практического использования предложенного привода были проведены вычислительные эксперименты на компьютерной модели, основным элементом которой является математическая модель, разработанная на основании принципиальной и динамической схем системы привода, приведенных на рис. 2. В упрощенном виде компоновочная схема безредукторного привода представлена на рис. 2, а. Основными его элементами являются лебедка с бицилиндроконическим барабаном, который приводится в движение двумя асинхронными двигателями 1 и 2. Реальный цилиндрический барабан можно заменить абстрактным

(теоретическим) барабаном, у которого радиус навивки каната изменяется от нуля до некоторого предельного значения, определяемого движущими и противодействующими моментами, геометрическими размерами и профилем участков барабана, диаметром каната.

При переходе каната к коническому участку на него укладывается длина каната $L_K = 2\pi r$ большая длины каната сходящей с цилиндрического участка.

$$L_K = 2\pi r = 2\pi r_l - 2\pi r_n =$$

$$= 2\pi \left[R_0 + \frac{(|\varphi| - \varphi_{OK}) \cdot S_{KH}}{2 \cdot \pi} \right] - 2\pi R_0;$$

$$r = \frac{(|\varphi| - \varphi_{OK}) \cdot S_{KH}}{2\pi},$$

где r – приведенный радиус барабана, определяющий длину укладки каната на его конические части; r_l , r_n – текущие радиусы барабана слева и справа от вертикальной оси симметрии; φ – текущий угол поворота барабана; φ_{OK} – угол поворота барабана, при котором на барабан виток к витку уложится заданная длина каната до начала его конической части; S_{KH} – вертикальный шаг канавки для укладки каната на коническую часть барабана; R_0 – радиус цилиндрической части барабана.

При разработке модели приняты следующие допущения: электромагнитные переходные процессы в системе двигателей не учитываются; валы и станины

принимаются абсолютно жесткими; масса каната на участке между подвеской и барабаном и волновые процессы в канате не учитываются. Диссипативная функция учитывается силами и моментами холостого хода.

Динамика привода описывается уравнениями:

$$\begin{cases} \frac{d\omega}{dt} = \frac{M_{дв} - M_{HK} \cdot \text{sign}(\varphi) - (M_{внт} + M_{тр}) \cdot \text{sign}(M_{дв})}{\sum J} \\ \frac{dv}{dt} = \frac{F_{HK} - F_{AK} - \left(\frac{F_T}{k_{II}} + F_{TP}\right) \cdot \text{sign}(v)}{m} \end{cases}$$

где $M_{дв} = M_1 - M_2$ – момент двигателей, приложенный к валу барабана; $M_{HK} = F_{HK} \cdot r$ – момент от силы натяжения каната,

приложенной к барабану; $F_{HK} = \lambda_{ст.кн} \cdot C_{кн} \cdot (1 + 0,05 \cdot \text{sign}(v))$ – сила натяжения каната; $M_{внт}$ – момент вентиляторов двигателей; F_{AK} – сила от ограничителя переподъема; F_T – сила тяжести подвески насосных штанг; m – масса подвески насосных штанг; J – суммарный момент инерции вращающихся частей; k_{II} – кратность полиспада. [3]

Компьютерная модель, фрагмент которой приведен ниже, составлена в системе *MathCAD* 2001.

$$y = (\omega_0 \quad \phi_0 \quad v_0 \quad x_0) \quad y := (0 \quad 0 \quad 0 \quad x_0)^T$$

$$D(t, y) := \begin{cases} \omega \leftarrow y_1 \\ \phi \leftarrow y_2 \\ v \leftarrow y_3 \\ x \leftarrow y_4 \\ s_1 \leftarrow 1 - \frac{\omega}{\omega_c} \\ s_2 \leftarrow 1 + \frac{\omega}{\omega_c} \\ Z_1 \leftarrow \left(r_1 + \frac{R_2 \cdot X_m^2 \cdot s_1}{R_2^2 + X_m^2 \cdot s_1^2} \right) + li \cdot \left(X_1 + \frac{R_2^2 \cdot X_m}{R_2^2 + X_m^2 \cdot s_1^2} \right) \\ Z_2 \leftarrow \text{if} \left[t < 0.8, 0, \left(r_1 + \frac{R_2 \cdot X_m^2 \cdot s_2}{R_2^2 + X_m^2 \cdot s_2^2} \right) + li \cdot \left(X_1 + \frac{R_2^2 \cdot X_m}{R_2^2 + X_m^2 \cdot s_2^2} \right) \right] \end{cases}$$

$$\left| \begin{aligned}
 k_{u1} &\leftarrow \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \\
 k_{u2} &\leftarrow \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \\
 \zeta_1 &\leftarrow \text{if} \left[s_1 \leq 1, \left(\frac{s_1 - s_{kp}}{1 - s_{kp}} \right) \cdot \Phi(s_1 - s_{kp}), 2 - s_1 \right] \\
 \zeta_2 &\leftarrow \text{if} \left[s_2 \leq 1, \left(\frac{s_2 - s_{kp}}{1 - s_{kp}} \right) \cdot \Phi(s_2 - s_{kp}), 2 - s_2 \right]
 \end{aligned} \right.$$

$$\left| \begin{aligned}
 M_1 &\leftarrow (\text{Re}(k_{u1}))^2 \cdot \left[M_{kp} \cdot \frac{2 \cdot (1 + s_{kp})}{\frac{s_1}{s_{kp}} + \frac{s_{kp}}{s_1} + 2 \cdot s_{kp}} + M_{\pi} \cdot \zeta_1 \right] \\
 M_2 &\leftarrow (\text{Re}(k_{u2}))^2 \cdot \left[M_{kp} \cdot \frac{2 \cdot (1 + s_{kp})}{\frac{s_2}{s_{kp}} + \frac{s_{kp}}{s_2} + 2 \cdot s_{kp}} + M_{\pi} \cdot \zeta_2 \right] \\
 r &\leftarrow \frac{(|\phi| - |\phi_{ок}|) \cdot S_{кн}}{2 \cdot \pi} \cdot \Phi(|\phi| - |\phi_{ок}|) \\
 1 &\leftarrow \frac{S_{кн}}{2} \cdot \left[(|\phi| - \phi_{ок}) \cdot \sqrt{(|\phi| - \phi_{ок})^2 + 1} + \text{asinh}(|\phi| - \phi_{ок}) \right] \cdot \Phi(|\phi| - |\phi_{ок}|) \\
 \lambda_{ст.кн} &\leftarrow 1 - x
 \end{aligned} \right.$$

$$\left| \begin{aligned}
 L &\leftarrow L_0 - x \\
 c_{кн} &\leftarrow \frac{\pi \cdot d_{кн}^2 \cdot E}{4 \cdot L} \\
 F_{нк} &\leftarrow \lambda_{ст.кн} \cdot c_{кн} \cdot (1 + 0.05 \cdot \text{sign}(\dot{v})) \\
 F_{ак} &\leftarrow \text{if} \left[x < x_{ак}, 0, (x - x_{ак}) \cdot c_{ак} \cdot (1 + 0.05 \cdot \text{sign}(\dot{v})) \right] \\
 F_{т} &\leftarrow m_{\pi} \cdot g \cdot (0.85 + 0.15 \cdot \text{sign}(\dot{v})) \\
 F_{тр} &\leftarrow 0.1 \cdot F_{т} \\
 M_{нк} &\leftarrow F_{нк} \cdot r \\
 M_{внт} &\leftarrow 0.05 \cdot M_{н} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_c} \right)^2 \\
 M_{тр} &\leftarrow 0.005 \cdot r_{пши} \cdot (F_{нк} + m_{рот} \cdot g)
 \end{aligned} \right.$$

$$\begin{aligned}
 M_{\text{ДБ}} &\leftarrow M_1 - M_2 \\
 u_1 &\leftarrow \frac{M_{\text{ДБ}} - M_{\text{HK}} \cdot \text{sign}(\phi) - (M_{\text{ВНТ}} + M_{\text{ТР}}) \cdot \text{sign}(M_{\text{ДБ}})}{2 \cdot J_{\text{Д}} + J_{\text{Б}}} \\
 u_2 &\leftarrow \omega \\
 u_3 &\leftarrow \frac{F_{\text{HK}} - F_{\text{ак}} - \frac{F_{\text{Т}}}{k_{\text{п}}} \cdot \text{sign}(v) - F_{\text{ТР}} \cdot \text{sign}(v)}{m_{\text{п}}} \\
 u_4 &\leftarrow v \\
 u &
 \end{aligned}$$

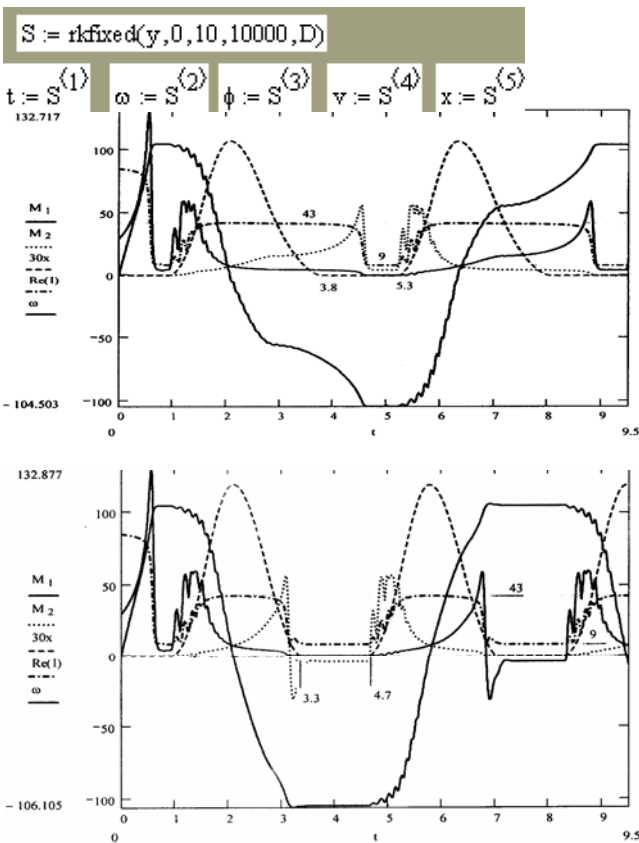


Рис. 3. Графики изменения во времени моментов, тока, угловой скорости двигателей и координаты перемещения точки подвеса насосных штанг при $k_n = 2$

Рис. 4. Графики изменения во времени моментов, тока, угловой скорости двигателей и координаты перемещения точки подвеса насосных штанг при $k_n = 4$

Вычислительные эксперименты проведены применительно к станку с грузоподъемностью 15 кН. В приводе исполь-

зованы двигатели серии АО2-52-6 ($P_n = 7,5$ кВт, $I_n = 16$ А, $n_n = 945$ об/мин), параметры схемы замещения которых приведены в [4]. Рассмотрено влияние изменения параметра k_n (кратность полиспаста) на показатели работы привода. На рисунках 3 и 4 приведены графики изменения во времени моментов, тока, угловой скорости двигателей и координаты перемещения точки подвеса насосных штанг (для удобства ра-

боты с графиками значения координаты x умножены на 30).

Из графиков следует, что в обоих экспериментах продолжительность запуска привода в работу при зашунтированном ($t_{\text{ш}} = 1$ с) двигателе №2 равно примерно 0,8 с. За это время ток двигателя №1 изменяется от 86 А до 9 А. При дальнейшей работе привода ток статорных обмоток двигателей не превышает 43 А.

В эксперименте с $k_{\text{п}} = 2$ двигатели работают в недопустимом режиме, так как продолжительность их работы с током 43 А в четыре раза превышает время работы при токе 9 А. За время спуска груза двигатели не успевают разогнаться до номинальной скорости, что указывает на недостаток запаса в аккумуляторах потенциальной энергии.

В эксперименте с $k_{\text{п}} = 4$ режим работы двигателей предпочтительнее. Эффективный ток двигателей порядка 20 А ($1,25 I_{\text{н}}$). Однако в потенциальных аккумуляторах (масса подвески и пружина ограничителя переподъема) запас энергии избыточный. В результате двигатели в конце спуска груза переходят в генераторный режим.

Выводы

Станок качалка с безредукторным асинхронным каскадным приводом имеет более простую кинематическую схему; показатели его работы (частота хода, высота подъема) сопоставимы с действующими станками; предложенная компьютерная модель может быть использована для НИР и ПКР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бочаров В.М. Электрический двигатель как адаптивный преобразователь энергии. Новые технологии управления движением технических объектов: Материалы 2-й междунар. науч. – технич. конф. Том 2 /Юж.-Рос. гос. техн ун-т. Новочеркасск: ЮРГТУ, 1999.

2. Бочаров В.М., Бочарова Т.В. Привод скважинного насоса/ Пат. RU2214534 С1, F 04 В 47/02. 20.10. 2003. Бюл.№29.

3. Степанов А.Г. Динамика машин, Екатеринбург: УрО РАН, 1999.

4. Петров И.И., Мейстель А.М. Специальные режимы работы асинхронного электро-привода. – М.: Энергия, 1968.

Коротко об авторах

Бочаров В.М. – кандидат технических наук, доцент,

Бочарова Т.В. – кандидат технических наук, доцент,

Сташинов Ю.П. – кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой,

Шахтинский институт (филиал) ЮРГТУ (НПИ), кафедра «Электрификация и автоматизация производства»,

Коннопелько В.В. – генеральный директор ОАО НПК «Электрические технологии», г. Ставрополь.



