

УДК 628.543.32

Н.И. Варминская, канд. техн. наук

Севастопольский национальный технический университет

Ул. Университетская, 33, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: root@sevtu.sebastopol.ua

ПРИМЕНЕНИЕ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСНЫМ ДВИЖЕНИЕМ В МАНИПУЛЯТОРАХ КОНЕЧНОЙ ЖЕСТКОСТИ

Выполнен анализ энергетических затрат на выполнение рабочих операций промышленными роботами различных конструкций; показана целесообразность использования оптимального управления для манипуляторов минимальной массы. Приведены примеры.

Ключевые слова: оптимальное управление, исполнительное устройство робота, энергетические затраты.

Применение манипуляторов конечной жесткости (как следствие, малой массы) обеспечивает снижение металлоемкости и энергетических затрат на рабочие операции [1, 2]. Проектирование манипуляторов меньшей массы, чем существующие в настоящее время, основано на использовании специальных законов управления переносным движением деформируемых объектов [3].

Целью исследований является анализ энергоемкости рабочих операций при оптимальном вращении руки промышленного робота.

Дифференциальное уравнение оптимального вращающего момента (исполнительного устройства, рисунок 1) без учета сопротивления имеет вид:

$$J_z \ddot{\varphi}_e = M,$$

где $J_z = m_1 R^2 / 3 + m R^2$ – физический момент инерции руки с распределенной и сосредоточенной массой; m_1 – распределенная масса руки; m – сосредоточенная масса перемещаемого объекта; R – вылет руки; $\varphi_e(t)$ – угол поворота в переносном

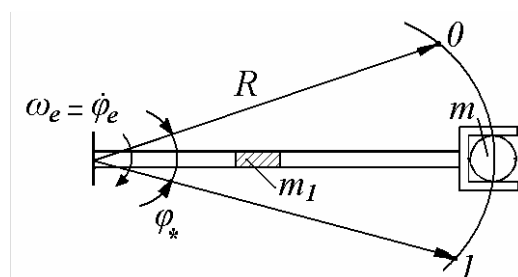


Рисунок 1 – Схема исполнительного устройства

вращательном движении; M – момент (управление). Угол поворота при вращательном оптимальном движении и производные записываются так [1]:

$$\varphi_e(t) = -\frac{\varphi_*}{2\pi} \sin pt + \frac{\varphi_* pt}{2\pi}, \quad \dot{\varphi}_e = \omega_e(t) = -\frac{\varphi_* p}{2\pi} \cos pt + \frac{\varphi_* p}{2\pi}, \quad \ddot{\varphi}_e(t) = \varepsilon_e(t) = \frac{\varphi_* p^2}{2\pi} \sin pt.$$

Как установлено ранее [1–3], данные зависимости при соотношении, например, $\omega/p = 2$ обеспечивают абсолютный покой упругой руки в конечном состоянии, где ω – частота собственных колебаний.

Из выражения для распределенной массы трубчатого поперечного сечения руки $m_1 = \pi d_n^2 (1 - \alpha^2) \rho / 4$ определяется наружный диаметр d_n и тогда осевой момент инерции вычисляется так:

$$J_y = \frac{\pi d_n^4 (1 - \alpha^4)}{64} = \frac{m_1^2 (1 + \alpha^2)}{4\pi (1 - \alpha^2) \rho^2},$$

где $\alpha = d_e/d_n$; d_e – внутренний диаметр руки, ρ – плотности материала. С учетом приведенной сосредоточенной массы руки с грузом $m_c = m_1 R / 2 + m$ для коэффициента жесткости $c = 3EJ_y / R^3$ следует выражение

$$c = \frac{3Em_1^2 (1 + \alpha^2)}{4\pi (1 - \alpha^2) \rho^2 R^3}.$$

Частота собственных колебаний равна $\omega = \sqrt{c/m_c}$. Время оптимального движения должно быть в целое число раз больше периода основного тона колебаний [2], что означает: $T_* = 2\pi n / \omega$; $n = 2, 3, 4, \dots$

Работа, затраченная на управляемое вращательное движение, вычисляется по формуле: $A = 2 \int_0^{\varphi_*/2} M d\varphi$

или с учетом $d\varphi_e = \omega_e dt$ следует $A = 2 \int_0^{T_*/2} J_z \ddot{\varphi}_e \omega_e dt$, где φ_* – общий угол поворота; $\dot{\varphi}_e = \omega_e$ – угловая скорость; T_* – общее время движения.

При $n=2$, т.е. $p=\omega/2$ выражение для работы за общее время движения (с учетом косой симметрии управления) при вводе обозначения $\xi = m_r/m$, где $m_r = m_1 R$, принимает вид:

$$A = \frac{K_0 m^2 \xi^2 (\xi + 3)}{\xi + 2}, \quad \text{где } K_0 = \frac{\Phi_*^2 E (1 + \alpha^2)}{8 \rho^2 R^3 \pi^3 (1 - \alpha^2)}.$$

Пример 1. Рассмотрен напольный промышленный робот с выдвижной рукой М-75 [4]. Технические характеристики М-75: грузоподъемность – 1,5 кг; наибольший вылет руки – 2080 мм; погрешность позиционирования – 0,5 мм; общая масса – 350 кг.

Исходные данные для промышленного робота М-75: $\Phi_* = \pi/4$; $\alpha = 0,8$; $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$, $R = 2,08 \text{ м}$; $d_n = 0,05 \text{ м}$; $E = 2 \cdot 10^{11} \text{ Па}$.

График зависимости $A = A(\xi)$ в пределах от $\xi = 2$ до $\xi = 30$ изображен на рисунке 2, а. График соответствует минимальному времени поворота (при $n=2$) руки на угол $\pi/4$. С ростом параметра $\xi = m_r/m$ увеличивается энергия, затрачиваемая на управление. Масса руки равна: $m_p = m_1 R + m_s$, где m_s – масса схвата. График зависимости работы, затраченной на управление, от ξ (при $n=6$) изображен на рисунке 2, б.

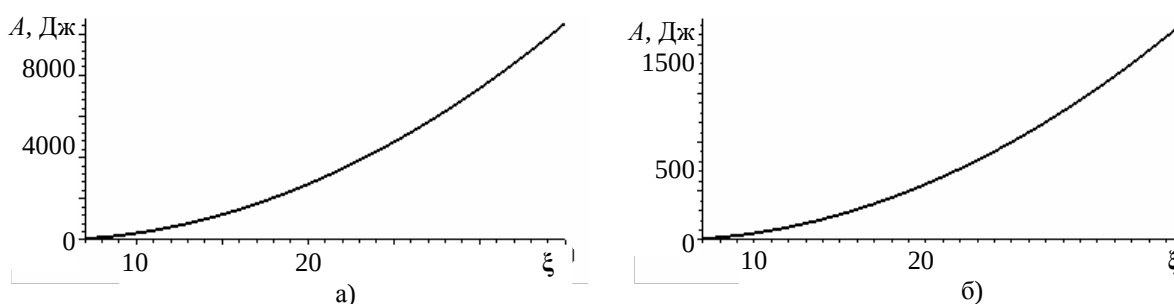


Рисунок 2 – Графики зависимости работы A от параметра ξ для манипулятора М-75:
а) при $n=2$; б) при $n=6$

Сечение руки из условия прочности подбирается, как известно, из выражения

$$w_z \geq M_{изг}^{\max} / [\sigma],$$

где w_z – осевой момент сопротивления сечения; $[\sigma]$ – допускаемое напряжение, которое, например, для стали $[\sigma] = 160 \text{ МПа}$; $M_{изг}^{\max}$ – изгибающий момент, т.е. $M_{изг}^{\max} = qR^2/2 + mgR$; q – распределенная нагрузка, т.е. $q = \pi d_n^2 (1 - \alpha^2) \rho g / 4$, где $g = 9,8 \text{ м/с}^2$. Прочность руки робота М-75 обеспечивается при $d_n = 0,026 \text{ м}$, а жесткость – при $d_n = 0,07 \text{ м}$.

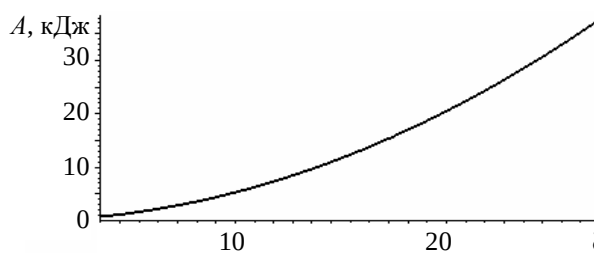


Рисунок 3 – График зависимости работы A от ξ (соотношения между массой руки и груза) для манипулятора KUKA KR 30 L 15/2

Пример 2. Напольный промышленный робот с многозвенной рукой KUKA KR 30 L 15/2. Технические характеристики KUKA KR 30 L 15/2: грузоподъемность – 15 кг; наибольший вылет руки – 2670 мм; погрешность позиционирования – 0,3 мм; общая масса – 930 кг. График зависимости работы A , затраченной на движение, от соотношения ξ между массой руки и груза изображен на рисунке 3. Для данного манипулятора из условия прочности наружный диаметр $d_n = 0,046 \text{ м}$, из условия жесткости – $d_n = 0,176 \text{ м}$.

Пример программы численного анализа для робота М-75.

> # Зависимость энергии A от ξ

> restart;

> F:=-f*sin(p*t)/(2*Pi)+f*p*t/(2*Pi): # угол поворота

```

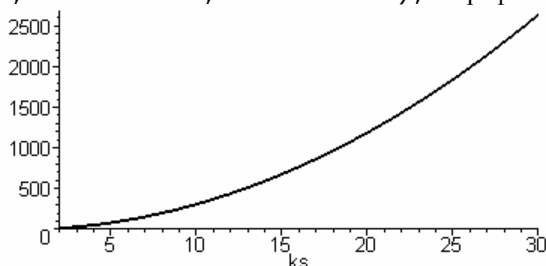
> F1:=diff(F,t): # угловая скорость
> F2:=diff(F1,t): # угловое ускорение
> J:=m1*R^3/3+m*R^2: # физический момент инерции
> dn:=sqrt(4*m1/(Pi*(1-a^2)*ro)): # наружный диаметр;
# m1 - распределенная масса
> Jx:=Pi*dn^4*(1-a^4)/64; M:=m1*R/2+m; # осевой момент инерции и
# приведенная масса
> c:=3*E*Jx/R^3: # коэффициент жесткости
> k:=(c/M)^(1/2): # частота собственных колебаний руки
> T:=(2*Pi*n/k): # время движения (период, умноженный на n)
> p:=k/n:
> A:=simplify(2*int(J*F2*F1,t=0..T/2)); # A - работа

$$A := - \frac{m_1^2 E f^2 (a^2 m_1 R + 3 a^2 m + m_1 R + 3 m)}{2 n^2 r o^2 \pi^3 R (-m_1 R + a^2 m_1 R - 2 m + 2 a^2 m)}$$

> K0:=evalf(f^2*E*(1+a^2)/ro^2/R^3/(Pi^3*n^2)/((1-a^2))):
# K0 - коэффициент
> A:=K0*mr^2*(mr+3*m)/(mr+2*m):
> A:=K0*ks^2*m^2*(ks+3)/(ks+2): # работа A как функция ks

> # ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ; ks=mr/m - отношение массы руки к массе груза
> n:=4: f:=Pi/4: R:=2.08: m:=1.5: dn:=0.1: a:=0.8: ro:=7800:
> E:=2*10^11: ms:=1: K0:=evalf(K0): m1:=evalf(ro*Pi*dn^2*
(1-a^2)/4): k:=evalf(k): TT:=evalf(2*Pi/k): A:
> mr:=evalf(ro*R*Pi*dn^2*(1-a^2)/4+ms): #mr - масса руки; ms - масса схвата
> plot(A,ks=2..30,color=black,thickness=2); #график зависимости A от ks

```

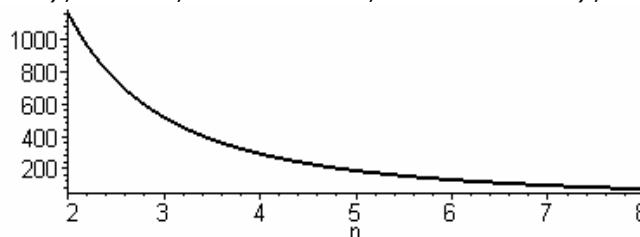


Если использовать время оптимального движения, соответствующее нескольким периодам колебаний, то можно в несколько раз снизить энергетические затраты на реализацию такого оптимального движения. Эту закономерность иллюстрирует график $A = A(n)$, который приведен ниже в тексте программы.

```

> restart; # график зависимости энергии управления A от n, где n = k/p
> K0:=evalf(f^2*E*(1+a^2)/ro^2/R^3/Pi^3/((1-a^2))):
> A0:=K0*ks^2*m^2*(ks+3)/(ks+2):
> # ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ
> f:=Pi/4: R:=2.08: m:=1.5: a:=0.9: ro:=7800: ks:=10: dn:=0.05:
ms:=1: E:=2*10^11: K0:=evalf(K0):
> plot(A0/(2*n^2),n=2..8,color=black, thickness=2);

```



```

> # С увеличением n работа гиперболически уменьшается

```

Изменение отношения массы исполнительного устройства к массе груза значительно влияет на энергозатраты, эта зависимость нелинейная. Например, при увеличении ξ в 3 раза энергия управления

увеличивается более чем в 8 раз. Как и следовало ожидать, с уменьшением массы руки уменьшаются энергозатраты на оптимальное управляемое вращательное движение. Оптимальные управления переносным движением упругих объектов предполагают их конечную жесткость. Управления данного типа для существующих конструкций манипуляторов все еще не применяются. Существующие манипуляторы обладают реальными резервами снижения их массы и, следовательно, жесткости.

При проектировании манипуляторов минимальной массы представляется возможность использовать предлагаемые управления, которые повышают производительность манипуляторов (в смысле быстродействия), снижают энергетические затраты на выполнение рабочих операций в связи с уменьшением массы исполнительных устройств и не требуют специальных демпфирующих устройств, так как приводят центр масс схвата к абсолютному или относительному покою в конце оптимального движения.

Численный анализ динамики промышленных роботов M-75 и KUKA KR 30 L 15/2 показывает, что существует возможность улучшить их технические характеристики при использовании исполнительных устройств с массой в 2 и более раз меньшей, чем существующие.

Дальнейшие исследования связаны с проектированием манипуляторов минимальной массы при ограничениях на их прочность, жесткость и энергетические затраты на выполнение рабочих операций.

Библиографический список

1. Бохонский А.И. Управление переносным движением упругих систем / А.И. Бохонский // Динамические системы: межвед. науч. сб. — Симферополь: КФТ, 2004. — Вып. 18. — С. 56–63.
2. Бохонский А.И. Оптимальные движения нежесткой руки манипулятора / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: междунар. сб. науч. тр. — Донецк: Изд-во ДонНТУ, 2004. — С. 13–17.
3. Бохонский А.И. Оптимальное управление переносным движением деформируемых объектов: теория и технические приложения / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, М.И. Мозолевский; под общ. ред. А.И. Бохонского. — Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2007. — 296 с.
4. Козырев Ю.Г. Промышленные роботы: Справ. / Ю.Г. Козырев. — М.: Машиностроение, 1983. — 376 с.

Поступила в редакцию 2.06.2010 г.