

Санкт-Петербургский политехнический университет  
Петра Великого

# Оптимизация закона движения роботов по критерию минимизации максимальной мгновенной мощности и типоразмера электрического мотора

А.Н.Волков, А.А.Корнилова, О.Н.Мацко, А.В.Мосалова

Санкт-Петербург,  
2020 г.

# Актуальность

Одним из основных требований к технике, предназначенной для работы в условиях Арктической зоны, и, особенно, для автономной работы, является **минимальное энергопотребление и минимальные значения потребляемых мгновенных электрических мощностей.**



# Существующие пути решения

- Проектирование новой техники **путем оптимизации конструктивных параметров** или в процессе эксплуатации – **путем разработки соответствующих алгоритмов и законов движения приводов** существующих роботов и других технологических машин
- Существенный вклад в энергосбережение вносит **уравновешивание вертикально перемещающихся масс** робота
- Снижение энергетических затрат достигается **путем применения рациональных параметров закона движения**, причем это может сопровождаться различным характером изменения максимальной мгновенной потребляемой мощности

# Общие уравнения движения привода

## Исходные данные:

- прямоугольный закон движения, симметричный относительно середины периода движения
- время разгона = время торможения

$$\rho(\alpha, \zeta) = \begin{cases} \frac{\alpha^2}{2\zeta(1-\zeta)}, & 0 \leq \alpha \leq \zeta \\ \frac{\zeta - 2\alpha}{\zeta(1-\zeta)}, & \zeta < \alpha \leq 1-\zeta \\ \frac{(1-\alpha)^2}{2\zeta(1-\zeta)} + 1, & 1-\zeta < \alpha \leq 1 \end{cases}$$
$$\dot{\rho}(\alpha, \zeta) = \begin{cases} \frac{\alpha}{\zeta(1-\zeta)}, & 0 \leq \alpha \leq \zeta \\ \frac{1}{1-\zeta}, & \zeta < \alpha \leq 1-\zeta \\ \frac{1-\alpha}{\zeta(1-\zeta)}, & 1-\zeta < \alpha \leq 1 \end{cases}$$
$$\ddot{\rho}(\alpha, \zeta) = \begin{cases} \frac{1}{\zeta(1-\zeta)}, & 0 \leq \alpha \leq \zeta \\ 0, & \zeta < \alpha \leq 1-\zeta \\ \frac{1}{\zeta(1-\zeta)}, & 1-\zeta < \alpha \leq 1 \end{cases}$$

Зависимость  
перемещения от времени

Зависимость скорости от  
времени

Зависимость ускорения  
от времени

где  $\rho(\alpha, \zeta) = s/s_0$ ,  $s$  – перемещение,  $s_0$  – величина хода,  $\alpha = t/T$ ,  $t$  – текущее время,  $\zeta = \tau/T$  – относительное время разгона,  $\tau$  – время разгона,  $\dot{\rho}(\alpha, \zeta) = vT/s_0$ ,  $v$  – скорость,  $\ddot{\rho}(\alpha, \zeta) = aT^2/s_0$ ,  $a$  - ускорение.

# Общие уравнения движения привода

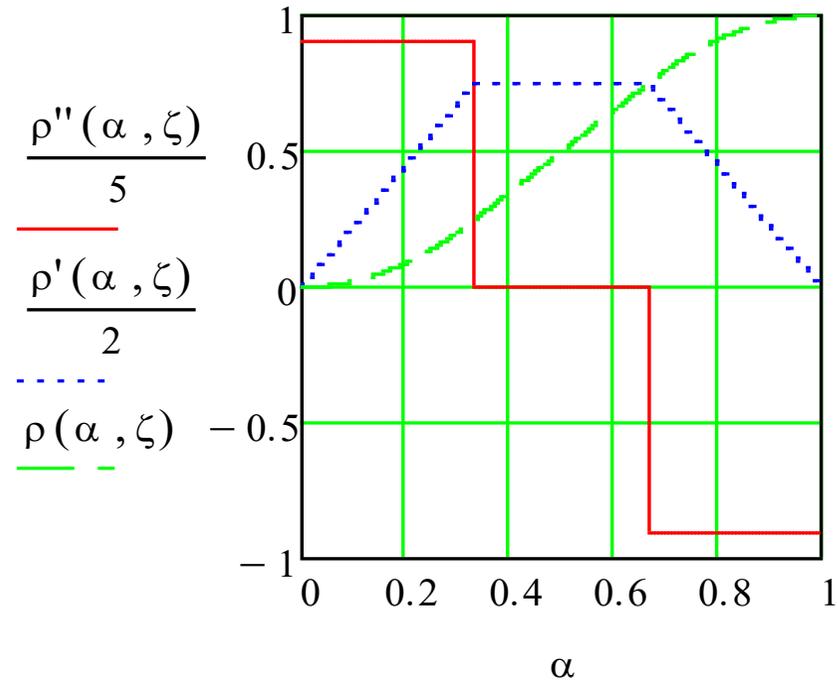


Рис. 1. Безразмерные законы изменения ускорения, скорости и перемещения

# Зависимость мгновенность мощности привода от параметров закона движения

Безразмерная мгновенная мощность в общем виде:

$$\eta(\alpha, \zeta, f) = \frac{NT^3}{ms_0^2} = \dot{\rho}(\alpha, \zeta) (\ddot{\rho}(\alpha, \zeta) + f)$$

где  $N$  – мгновенная мощность,  $m$  – приведенная масса,  $f = FT^2/ms_0$  - приведенная сила,  $F$  - сила сопротивления.

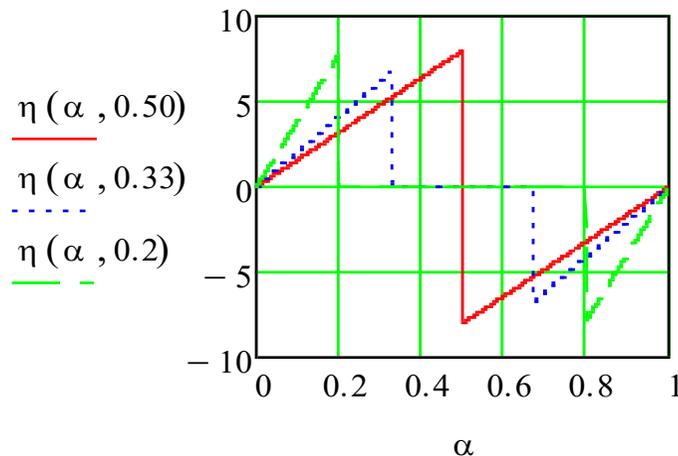


Рис. 2. Безразмерная зависимость мгновенной мощности от времени при различных временах разгона

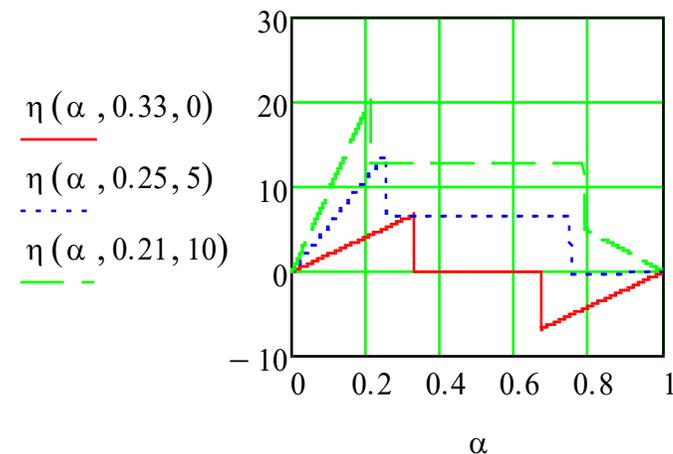


Рис. 3. Безразмерная зависимость мгновенной мощности от безразмерного времени при различных нагрузках

# Зависимость мгновенность мощности привода от параметров закона движения

Максимальная мгновенная мощность, требуемая в конце участка разгона:

$$\eta_m(\zeta, f) = \frac{1}{1 - \zeta} \left[ \frac{1}{\zeta(1 - \zeta)} + f \right]$$

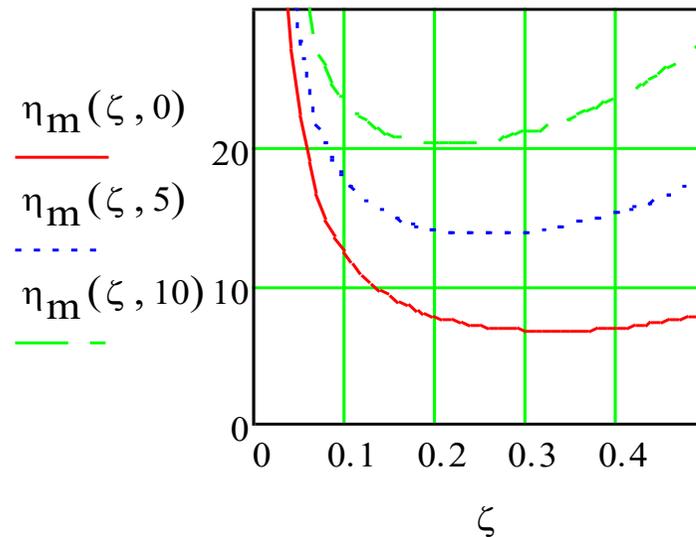


Рис. 4. Зависимость максимальной мгновенной мощности от времени разгона при различных нагрузках

# Зависимость мгновенность мощности привода от параметров закона движения

Оптимальное время разгона, обеспечивающее минимум мгновенной мощности:

$$\zeta_m(f) = \frac{2fu(f) + f(3^{1/2}i - 1) - fu(f)^2(3^{1/2}i + 1) + 9(3^{1/2})i - 9}{6fu(f)}$$

где  $u(f) = \left[ 3 \left( -\frac{3f^2 + 27f + 81}{f^3} \right) + 1 \right]^{1/3}$

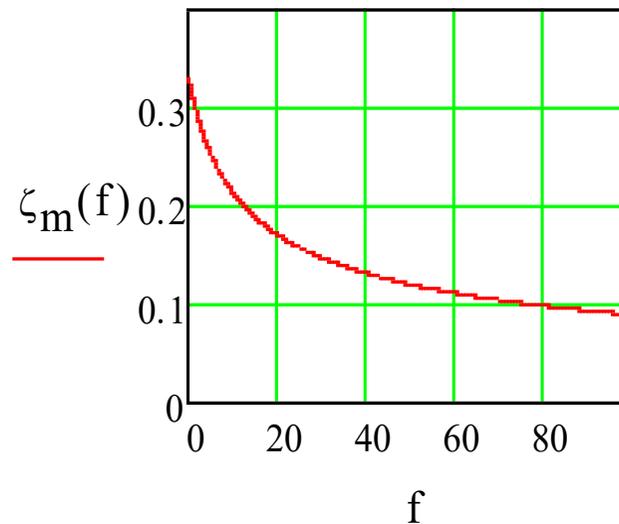


Рис. 5. Зависимость оптимального времени разгона от нагрузки

# Зависимость мгновенность мощности привода от параметров закона движения

Зависимость эффективности оптимизации времени разгона от величины нагрузки:

$$\delta(f) = \frac{\eta_m(0,5; f) - \eta_m(\zeta_m(f); f)}{\eta_m(\zeta_m(f); f)} 100\%$$

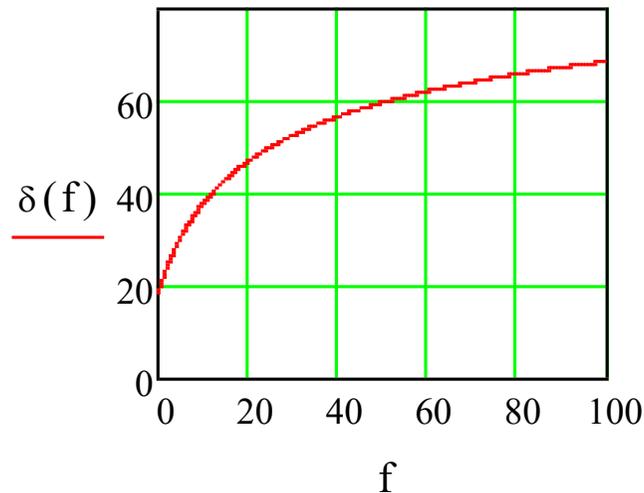


Рис. 6. Зависимость эффективности оптимизации времени разгона от нагрузки

# Зависимость потребляемой приводом энергии за один цикл от времени разгона

Безразмерная работа привода, совершаемая за один цикл:

$$A(\zeta, f) = \begin{cases} \int_0^{1-\zeta} \eta(\alpha, \zeta, f) d\alpha, & f \leq \frac{1}{\zeta(1-\zeta)} \\ \int_0^{1-\zeta} \eta(\alpha, \zeta, f) d\alpha, & f > \frac{1}{\zeta(1-\zeta)} \end{cases}$$

Торможение с использованием генераторного режима с диссипацией энергии в тормозном резисторе или мех. тормоза

Торможение за счет сил сопротивления, когда привод продолжает работать в тяговом режиме

Условие перехода от одной расчетной формулы к другой для точки начала торможения  $\alpha = 1 - \zeta$  :

$$\dot{p}(1 - \zeta, \zeta) [\ddot{p}(1 - \zeta, \zeta) + f] = 0$$

Зависимость силы сопротивления от времени разгона, при которой на участке торможения движение будет осуществляться исключительно под действием сил сопротивления:

$$f(\zeta) = \frac{1}{\zeta(1-\zeta)}$$

# Зависимость потребляемой приводом энергии за один цикл от времени разгона

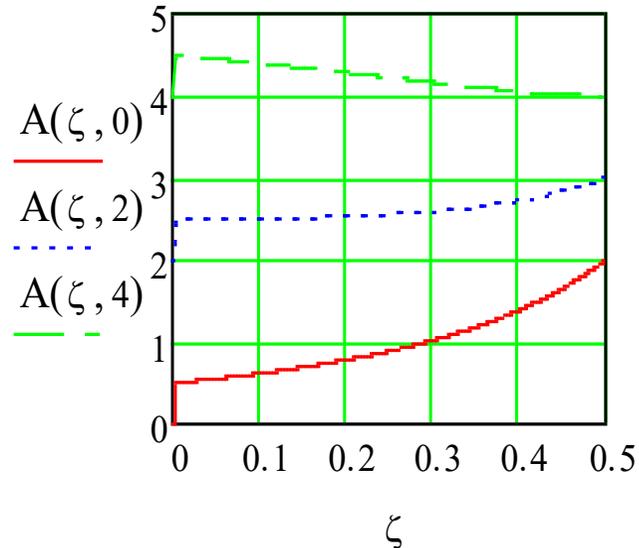


Рис. 7. Зависимость энергетических затрат цикла от времени разгона при различных нагрузках

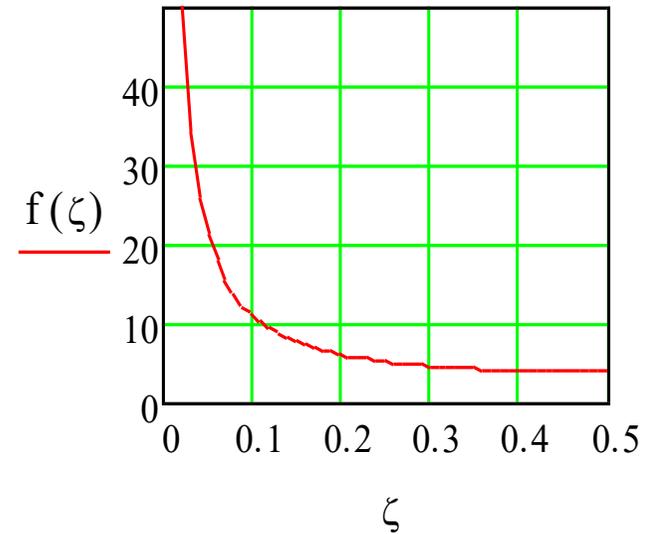


Рис. 8. Зависимость силы сопротивления, обеспечивающей торможение за счет сил сопротивления, от времени разгона

# Зависимость потребляемой приводом энергии за один цикл от времени разгона

Абсолютная величина предельной силы сопротивления для преодоления участка  $s_0$  за время  $T$ :

$$F = \frac{4s_0}{T^2} m$$

Коэффициент эффективности оптимизации по энергопотреблению за один цикл для оценки эффективности оптимизации параметров закона движения:

$$\delta 1(\zeta, f) = \frac{A(0,5; f) - A(\zeta, f)}{A(\zeta, f)} 100\%$$

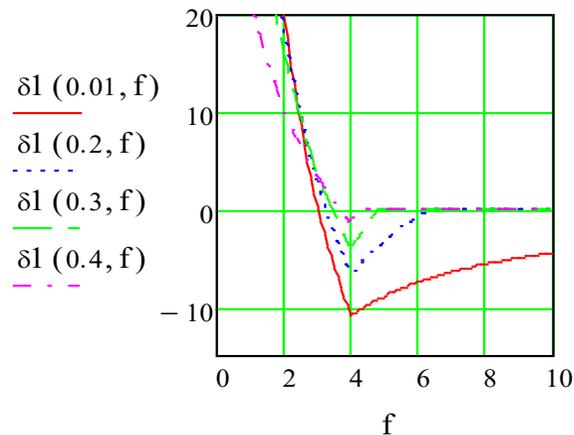


Рис. 9. Зависимость эффективности оптимизации энергозатрат от нагрузки при различных временах разгона

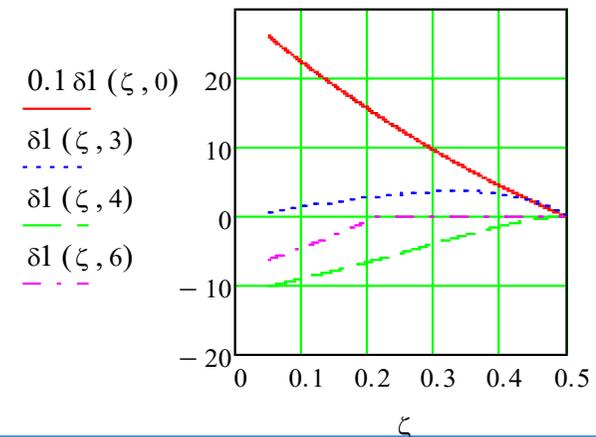


Рис. 10. Зависимость эффективности оптимизации энергозатрат от времени разгона при различных нагрузках

# Зависимость потребляемой приводом энергии за один цикл от времени разгона

Зависимость максимума потребляемой мгновенной мощности от энергетических затрат одного цикла от безразмерного времени разгона  $0,05 < \zeta < 0,5$ :

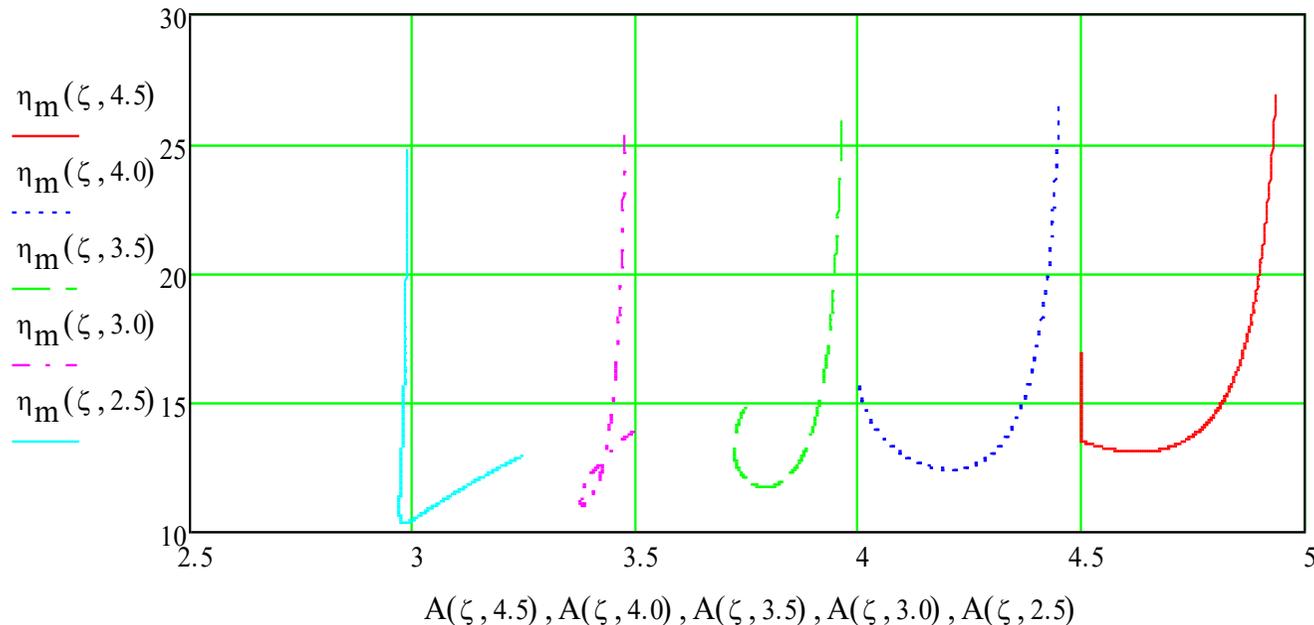


Рис. 11. Зависимость максимальной мгновенной мощности от энергетических затрат при различных нагрузках

# ВЫВОДЫ

1. Оптимизация законов движения приводов для прямоугольного закона изменения ускорения позволяет **снизить максимальное значение мгновенной потребляемой мощности** на десятки процентов в зависимости от нагрузки.
2. Предложенный подход к выбору параметров закона движения позволяет в отдельных случаях, наряду с мощностью, **снизить и энергетические затраты**.
3. Полученные результаты можно использовать для **многокритериальной оптимизации привода**, когда в качестве критериев выбраны мгновенная мощность, энергетические затраты и массогабаритные параметры привода, зависящие от мощности электрического мотора.
4. Полученные результаты целесообразно использованы не только при проектировании новых машин, но и **для оптимизации законов движения приводов уже существующего оборудования**, что в большинстве случаев потребует минимальных затрат, обусловленных их перепрограммированием.
5. Также большой практический интерес оптимизация закона движения представляет **для оборудования, работающего с нагрузками, которые меняются** в каждом новом цикле.