

ОПТИМАЛЬНОЕ ПО ЭНЕРГОЗАТРАТАМ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ РАБОЧЕГО ХОДА ПЛАТФОРМЫ ЛЕТУЧЕЙ ПИЛЫ

Введение. Летучие пилы (ЛП) применяются в составе непрерывных технологических линий по производству длинномерных материалов, например, на профилегибочных или трубоэлектросварочных станах [1]. Несущим органом ЛП является платформа, на которой размещено оборудование резательной системы. Точность мерного пореза, продуктивность таких линий и энергоемкость продукции в значительной мере определяются энергоэффективностью и траекторной оптимальностью процессов движения привода платформы летучей пилы [2]. Рабочий цикл привода платформы содержит периоды рабочего и обратного хода, первый из которых содержит участки разгона с преследованием сечения реза длинномерного материала (профиля, трубы и др.) и движения с постоянной скоростью с выполнением технологической операции пореза [3]. Некоторые задачи расчета скоростных и траекторно-временных параметров законов движения привода платформы ЛП рассматривались в [4], однако лишь в аспекте вычислительных процедур. В свете актуальной научно-технической проблемы снижения ресурсоемкости товарной продукции необходимо переходить от оптимальных по быстродействию к оптимальным по энергозатратам законам движения несущих органов летучих пил.

Цель исследования. Разработка оптимального по энергозатратам закона движения привода платформы летучей пилы в режиме рабочего хода.

Материалы исследования. Статическая нагрузка привода платформы имеет реактивный характер и может считаться нагрузкой типа "сухое трение" [5, с. 42-45]. Уравнение движения электропривода в относительных единицах имеет вид

$$\mu - \mu_c = \dot{v}, \quad (1)$$

где $\mu = M/M_n$ – электромагнитный момент двигателя, в относительных единицах; $\mu_c = M_c/M_n$ – статический момент, приведенный к скорости двигателя, в относительных единицах; M и M_n – соответственно текущее и номинальное значения электромагнитного момента двигателя в абсолютных единицах; $v = \omega/\omega_n$ – угловая скорость вращения вала двигателя в относительных единицах; ω и ω_n – соответственно текущее и номинальное значение угловой скорости вращения вала двигателя в абсолютных единицах; $\dot{v} = dv/d\tau$ – производная скорости (ускорение); $\tau = t/T_m$ – время в относительных единицах; $T_m = J\omega_n/M_n$ – механическая постоянная времени, J – момент инерции механической части электропривода, приведенный к скорости ω , в абсолютных единицах.

Модель электромеханической системы (ЭМС) предусматривает известной функцию $\mu_c(\tau)$. Однако, реактивный статический момент типа "сухое трение" при $|v| > 0$, если пренебречь составляющими вязкого трения, является функцией скорости вида

$$\mu_c = \mu_{c*} \cdot \text{sign}(v). \quad (2)$$

При $v=0$ имеем две возможных ситуации: $|\mu| > \mu_{c*}$ и $|\mu| \leq \mu_{c*}$. В первой из этих ситуаций механическая система сохраняет свои свойства, а при возникновении второй ситуации имеют место равенства $\mu_c = \mu$, $\dot{v} = 0$, поскольку реактивный момент сопротивления в таком случае является реакцией на движущий момент μ .

Рабочий ход привода платформы ЛП содержит пять следующих один за другим участков движения, первый из которых назовем участком вывода из "зоны неподвижности". На этом участке движения $v=0$, $|\mu| \leq \mu_{c*}$. Задачей управления является увеличение момента μ от $\mu_0 \geq 0$ до μ_{c*} . Уравнение системы на этом участке имеет вид

$$\dot{x}_1(\tau) = u(\tau), \quad (3)$$

где $x_1 = \mu$, т.е. целью управления является изменение координаты x_1 от начального значения $x_{10} = \mu_0$, $|\mu_0| \leq \mu_{c*}$, к конечному $x_{1\theta} = \mu_{c*}$, при неподвижном состоянии ($v=0$) инерционной массы ЭМС. Эта задача относится к классу задач управления с закрепленными концами фазовой траектории $x_1(\tau)$, с крайевыми условиями $x_1(0) = x_{10}$, $x_1(\theta) = x_{1\theta}$, $0 \leq \tau \leq \theta$, где θ – неопределенное время движения. На управление $u(\tau)$ накладывается ограничение

$$|u(\tau)| \leq u_{\text{доп}}, \quad (4)$$

где $u_{\text{доп}} = \dot{\mu}_{\text{доп}}$ – допустимая скорость изменения электромагнитного момента двигателя. Такое ограничение обусловлено требованиями эксплуатационной надежности как двигателя, так и технологической системы в целом.

На втором участке движения ставится задача изменения ускорения от начального значения $\dot{v}(0)$ к конечному $\dot{v}(\theta)$ при "подвижном" состоянии ЭМС, когда $|\mu_0| \geq \mu_{c*}$ на всем интервале времени $\tau \in [0, \theta]$ движения ЭМС. Однако, эта задача сводится к задаче изменения электромагнитного момента двигателя от начального значения $\mu(0) = \mu_0 = \mu_{c*}$ к конечному $\mu(\theta) = \mu_{\theta} = \dot{v}(\theta) + \mu_{c*}$ при "подвижном" состоянии ЭМС. Это означает, что на данном участке движения математическая постановка задачи управления будет такой же, как и на первом, но только в аналитической форме без задания числового значения $\mu(\theta)$. Однако при постановке второй задачи необходимо

быть уверенными, что на всем интервале времени $t \in [0, \theta]$ движения системы (3) исключается попадание ЭМС в "неподвижное" состояние, т.е. невозможно возникновение условия $|\mu(\tau)| \leq \mu_{c*}, v=0$. В режиме рабочего хода лезвия пилы это условие выполняется.

При постановке задачи оптимального по энергозатратам управления системой (3) на первом и втором участках движения цель управления формулируется как минимизация функционала

$$I = \int_0^{\theta} x_1^2 d\tau \quad (5)$$

при ограничении (4). Заметим, что для электроприводов постоянного тока функционал (5) отображает потери энергии достаточно точно, а для электроприводов переменного тока – приближенно [6].

На третьем участке справедливо уравнение движения (1). Ставится задача изменения скорости в пределах от $v(0)$ до $v(\theta)$. Задача решается в аналитической форме для уравнения системы

$$\dot{x}_1 = u(\tau) - \mu_{c*}, \quad (6)$$

где $x_1 = v$; $u = \mu$, с целевым функционалом

$$I = \int_0^{\theta} u^2(\tau) d\tau \quad (7)$$

и ограничением вида (4), где $u_{доп} = \mu_{доп}$, $\mu_{доп}$ – допустимое значение момента.

На четвертом участке движения ставится такая же задача управления, как на втором участке для системы (3) с целевым функционалом (5). Задача решается в аналитической форме с краевыми условиями $\mu(0)$ и $\mu(\theta)$, что равносильно заданию $\dot{v}(0)$ и $\dot{v}(\theta)$, причем $\mu(\theta) = \mu_{c*} + \Delta\mu$ ($\dot{v}(\theta) \geq 0$).

Величина $\Delta\mu$ задается отличной от нуля, однако небольшой, во избежание чрезмерного натяжения материала при сцеплении с ним платформы ЛП.

На пятом участке движения привода имеет место синхронизация по скорости движения платформы ЛП и обрабатываемого материала, когда осуществляется его порез. На этом участке $\mu = \mu_{c*} + \Delta\mu$, $v(\tau) = v_{OM}$, где v_{OM} – скорость движения обрабатываемого материала, благодаря жесткому сцеплению платформы с обрабатываемым материалом. Здесь $v_{OM} = V_{OM}/(\rho\omega_n)$, где ρ – радиус приведения, V_{OM} – линейная скорость движения обрабатываемого материала в абсолютных единицах.

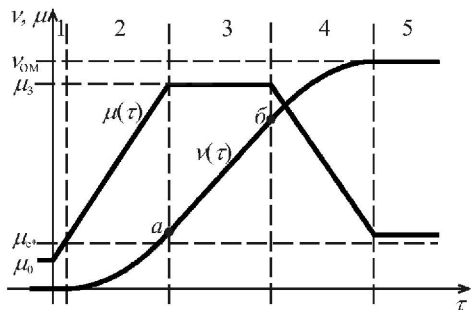


Рис.1. Тахограмма и нагрузочная диаграм-

ных единицах. На этом участке привод работает в режиме регулирования момента на заданном уровне $\mu = \mu_{c*} + \Delta\mu$, источником скорости является обрабатываемый материал.

Решение поставленных задач управления на участках 1, 2 и 4 рабочего хода ЛП, качественные тахограмма $v(\tau)$ и нагрузочная диаграмма $\mu(\tau)$ двигателя для которого показаны на рис.1, известно [7]:

$$u(\tau) = u_{доп} \text{sign}(x_1 - x_{10}). \quad (8)$$

Задача преследования сечения реза на обрабатываемом материале решается формированием закона движения привода на участках 1-4 (рис.1) при заданном значении v_{OM} . Кроме того, задан путь s перемещения платформы за время разгона $\theta_p = \theta_2 + \theta_3 + \theta_4$. В относительных единицах этот путь равен $\alpha = s/(\omega_n \rho T_m)$. В связи с этим задача управления на участке 3 представляет собой задачу разгона при заданных значениях приращений Δv_3 скорости и $\Delta \alpha_3$ перемещения. Оптимальный по энергозатратам закон движения привода в режиме разгона известен [6]:

$$\mu = \text{const}, \dot{v} = \text{const}, v = v_a + \dot{v}\tau. \quad (9)$$

Следовательно, значения ускорения и момента в точках сопряжения a и b одинаковы. Обозначим их \dot{v}_3 и μ_3 .

Продолжительности участков 1, 2 и 4:

$$\theta_1 = (\mu_{c*} - \mu_0) / \dot{\mu}_{доп}; \quad (10)$$

$$\theta_2 = \dot{v}_3 / \dot{\mu}_{доп}; \quad (11)$$

$$\theta_4 = (\dot{v}_3 - \Delta\mu) / \dot{\mu}_{доп}, \quad (12)$$

где $\dot{v}_3 = \mu_3 - \mu_{c*}$, $\dot{v}_3 - \Delta\mu = \mu_3 - (\mu_{c*} + \Delta\mu)$.

Значения скорости v в точках a и b (рис.1) равны [4]:

$$v_a = \dot{v}_3^2 / (2\dot{\mu}_{доп}), \quad (13)$$

$$v_b = v_{OM} - \dot{v}_3^2 / (2\dot{\mu}_{доп}) + \Delta\mu^2 / (2\dot{\mu}_{доп}). \quad (14)$$

Путь перемещения на участках 2, 3 и 4 в относительных единицах

$$\alpha_2 = \dot{v}_3^3 / (6\dot{\mu}_{доп}^2); \quad (15)$$

$$\alpha_3 = (v_6^2 - v_a^2) / (2\dot{v}_3); \quad (16)$$

$$\alpha_4 = (\dot{v}_3 - \Delta\mu)(6v_{OM}\dot{\mu}_{доп} - \dot{v}_3^2 - \dot{v}_3\Delta\mu + 2\Delta\mu^2) / (6\dot{\mu}_{доп}^2); \quad (17)$$

$$\alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 = \alpha. \quad (18)$$

Заданные значения $\dot{\mu}_{доп}$, v_{OM} и α определяют величины ускорения \dot{v}_3 при разгоне и соответствующего ему момента $\mu_3 = \dot{v}_3 + \mu_{c*}$.

Из уравнения (18) с учетом (13-17) получаем выражение ускорения на третьем участке движения:

$$\dot{v}_3 = \frac{a - \sqrt{a^2 - b^3/2}}{b}, \quad (19)$$

где $a = 2\alpha\dot{\mu}_{доп}^2 + 2v_{OM}\dot{\mu}_{доп}\Delta\mu + \frac{2}{3}\Delta\mu^3$, $b = 2v_{OM}\dot{\mu}_{доп} + \Delta\mu^2$.

Заметим, что соблюдение ограничения $\dot{v}_3 = \mu_3 \leq \mu_{доп}$ должно обеспечиваться соответствующими геометрическими размерами технологической линии при ее конструировании, соотношением максимально возможной скорости V_{OM} и минимального значения мерной длины разрезаемого материала.

Продолжительность разгона на третьем участке

$$\theta_3 = v_{OM}/\dot{v}_3 - \dot{v}_3/\dot{\mu}_{доп} + \Delta\mu^2/(2\dot{\mu}_{доп}\dot{v}_3). \quad (20)$$

Время разгона на участках 2-4

$$\theta_p = \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 = \frac{v_{OM}}{\dot{v}_3} + \frac{\dot{v}_3 - \Delta\mu}{\dot{\mu}_{доп}} + \frac{\Delta\mu^2}{2\dot{\mu}_{доп}\dot{v}_3}. \quad (21)$$

Общее время разгона в режиме преследования на участках 1-4

$$\theta_{II} = \theta_p + \theta_1 = \frac{v_{OM}}{\dot{v}_3} + \frac{\dot{v}_3 + \mu_{c*} - \mu_0 - \Delta\mu}{\dot{\mu}_{доп}} + \frac{\Delta\mu^2}{2\dot{\mu}_{доп}\dot{v}_3}. \quad (22)$$

Значение θ_{II} служит исходным данным для определения момента запуска привода "на рез". Значение координаты α_{OM} положения сечения реза на обрабатываемом материале, при котором производится запуск привода:

$$\alpha_{OM} = \alpha_0 + \alpha - v_{OM}\theta_{II}, \quad (23)$$

где α_0 – значение координаты начального положения платформы ЛП.

Выводы. Алгоритмически определен оптимальный по энергозатратам закон движения привода платформы ЛП в режиме рабочего хода (рис.1), в соответствии с которым управляющие воздействия формируются по (8-9). Определяющим параметром является величина ускорения при разгоне \dot{v}_3 , которая вычисляется в соответствии с (19) по заданным значениям допустимой скорости изменения момента двигателя $\dot{\mu}_{доп}$, скорости движения обрабатываемого материала v_{OM} и пути a перемещения платформы за время разгона, а также момента натяжения $\Delta\mu$. Запуск привода "на рез" производится при достижении положения сечения реза на обрабатываемом материале α_{OM} , вычисляемого по (23). Современные системы электропривода позволяют реализовать законы движения типа показанного на рис.1, при программном задании координат граничных точек участков 1-4 с переходом в режим регулирования момента на участке 5 (рис.1).

Литература.

1. Червяков В.Д., Паньч А.А. Летучие механизмы как класс рабочих машин в аспекте задач управления// Электротехнические системы и комплексы: Межвузовский сборник научных трудов. – Магнитогорск: МГТУ, 1998. Вып.3. – С.176-182.
2. Червяков В.Д., Паньч А.А. Задачи ресурсосберегающего управления электроприводом несущего органа летучей пилы// Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірка наукових праць. Тематичний випуск 10. – Харків, НТУ ХПІ, 2001. – С.370-371.
3. Паньч А.А., Червяков В.Д. Ситуационный анализ рабочего цикла летучей пилы// Праці П'ятої Української конференції з автоматичного управління "Автоматика-98" – ч.ІІІ – Київ: видавництво НТУУ КПІ. – 1998. – С.226-230.
4. Паньч А.А., Червяков В.Д. Повышение управляемости и точности прогнозирования процесса движения несущего органа летучей пилы// Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ. – Кременчук: КДПУ, 2004. – Вип. 2/2004(25). – С.62-67.
5. Теорія електропривода: Підручник/ М.Г. Попович, М.Г. Борисюк, В.А. Гаврилюк та ін.; За ред. М.Г. Поповича. – Вища шк., 1993. – 494 с.
6. Петров Ю.П. Оптимальное управление электрическим приводом с ограничением по нагреву. – Л.: Энергия, 1971. – 144 с.
7. Бережной О.І. Оптимальне за енерговитратами формування закону змінення прискорення одномасової електромеханічної системи// Матеріали та програма науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів фізико-технічного факультету. Том ІІ. – Суми: Вид-во СумДУ, 2008. – С.30.